



## **Estudo de métodos para a conversão da energia das ondas oceânicas**

Christof Omar

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Dissertação orientada por:  
Professor Miguel Centeno Brito  
Professor Roberto Gamboa



## Agradecimentos

A elaboração desta dissertação foi apoiada pelo empenho e ajuda de várias pessoas, às quais pretendo agradecer nestas breves linhas que tentarão fazer justiça à minha gratidão.

Em primeiro lugar aos meus pais, por possibilitarem a grande oportunidade que é frequentar um curso do ensino superior.

Aos meus irmãos. Ao Cláudio que batalhou com o seu próprio trabalho de Mestrado, sabendo dar dicas sábias e tornar os meus dias mais otimistas. Ao David, por facultar-me o seu saber de materiais e conhecimentos práticos, ajudando sempre que podia.

Aos meus orientadores. O Professor Doutor Miguel Centeno Brito e o Professor Roberto Gamboa, por ajudarem a definir prioridades e pela paciência face aos meus devaneios.

Ao Professor Doutor Fernando Marques da Silva, pela pronta disponibilidade e conselhos úteis em alturas decisivas.

Aos meus amigos e colegas, cuja companhia tive o prazer de ter ao longo deste percurso académico. Não refiro nomes, mas de certo, saberão quem são quando agradeço pelas idas à cantina e ao café diário, um evento requintado, repleto de classe e paródia, uma pausa agradável entre as alturas de trabalho. Igualmente, expresso a minha gratidão por passarem os bons e maus momentos comigo e por todos os conselhos dados.

Finalmente à Ana, por saber exatamente e em qualquer altura o que dizer para me inspirar e dar confiança. Por apoiar-me nas minhas decisões, por toda a paciência que tem e por nunca me deixar desistir. Os meus mais sinceros agradecimentos.



## Resumo

Nas últimas duas décadas, novas políticas governamentais e metas obrigatórias de energias renováveis conduziram a um crescente interesse em fontes de energia oceânicas. A dinâmica complexa dos oceanos apresenta um vasto potencial, seja através de vento *offshore*, correntes marinhas, gradientes de temperatura, marés ou ondas. As ondas oceânicas em particular, constituem um recurso que pode ser explorado de diversas formas, desde sistemas de coluna de água oscilante a operar na costa, até mecanismos óleo-hidráulicos localizados no fundo marinho.

Na presente dissertação procurou-se, em primeira linha, estudar métodos para a conversão da energia das ondas oceânicas com base numa ideia inicial. Esta consistiu em dois reservatórios de ar, compressíveis pelo peso das ondas, e um tubo no centro do sistema contendo uma turbina bidirecional. Este conceito, explorado num ramo teórico-prático, viria provar-se tecnicamente semelhante a um outro conversor já existente: o *Delos - Reyes Morrow Pressure Device*. Não obstante, construiu-se um modelo simples efetuando-se ensaios práticos a seco e uma tentativa experimental na praia. Os ensaios a seco demonstraram uma compressão rápida face à pressão exercida num reservatório e obtiveram-se velocidades máximas de escoamento do ar na ordem dos 10 m/s. Por outro lado, o ensaio na praia terminou inconclusivo quanto a resultados numéricos. As conclusões, juntamente com um entendimento mais aprofundado da física das ondas oceânicas, levaram ao desenvolvimento de um segundo conceito num panorama exclusivamente teórico.

Para isso procedeu-se com um dimensionamento computacional em AutoCAD e a construção de um algoritmo, em Matlab, partindo de determinados pressupostos e aproximações. O algoritmo retrata, até um certo limite, a interação entre o modelo e as ondas, considerando as forças envolvidas e calculando uma força resultante para um intervalo iterativo. Através da análise numérica melhoraram-se as características de um modelo à escala 1:2 com 8,8 kW de potência nominal até obter uma estrutura final com parâmetros otimizados. Com base nesta estrutura dimensionou-se o modelo à escala 1:1 com 85 kW de potência nominal.

O modelo foi simulado para os dados tri-horários de altura e período de onda da zona de Peniche e do Baleal, maioritariamente para o ano 2009, que apresentou registos para o ano inteiro. Os resultados obtidos indicaram tempos de operação anuais superiores a 7000 horas. A eficiência global de conversão atingiu valores máximos de 15 % e média anual de 5,6 %. O fator de capacidade médio foi 0,35 totalizando 262 MWh de energia elétrica.

A viabilidade técnica do modelo apresentou-se fortemente dependente do nível da água. Os pressupostos aplicados requerem uma análise mais detalhada através de ferramentas de computação da dinâmica de fluidos de forma a recriar situações de operação reais.

**Palavras-Chave:** Energia das ondas oceânicas; Conversor da energia das ondas; Turbina Wells; Análise numérica



## Abstract

In the last two decades, new governmental policies and mandatory Renewable Energy targets brought an increasing interest in ocean energy sources. The oceans' complex dynamics represent a vast potential, be it through offshore wind, ocean currents, temperature gradients, tides or waves. Ocean waves constitute a resource which can be explored in many ways ranging from oscillating water column systems, operating on the shore, to hydraulic-pump mechanisms located on the bottom of the ocean.

The main target of this dissertation was to explore different types of Wave Energy Converters, starting from an initial idea. The concept consisted of two compressible air chambers with a tube in the center containing a bidirectional air turbine. The idea, thought for a theoretical and practical approach, would prove to be technically similar to another existing converter: the *Delos - Reyes Morrow Pressure Device*. Nonetheless, a simple structure was constructed, and practical tests in lab and at the beach were carried out. The dry-tests showed a fast compression of the chambers when pressure was applied, and the maximum air velocities obtained were around 10 m/s. On the other hand, the test on the beach finished without any numerical results. The conclusions, combined with a deeper understanding of ocean wave physics, led to the development of a second concept in a theoretical panorama.

A computational sizing in AutoCAD was made and the construction of an algorithm, in Matlab, based on certain assumptions and approximations. The algorithm depicts, to a certain extent, the interaction between the model and the waves, considering the forces involved and calculating a resulting force for an iterative interval. Through the numerical analysis, the constructive aspects were improved for a 1:2 scale model with 8,8 kW of nominal power, until a final structure with optimized parameters was concluded. Based on the latter, the 1:1 scale model was dimensioned with a nominal power of 85 kW.

The 1:1 scale model was simulated for the consecutive three-hour data of wave height and period of the Peniche and Baleal zone. This was done, mainly for the year 2009 which presented data for the whole year. The results obtained estimated annual operating times of over 7000 hours. Overall conversion efficiency reached maximum values of 15 % and annual average of 5,6 %. The average capacity factor was 0,35, totaling 262 MWh of electricity.

The technical feasibility of the model was strongly dependent on the water level. The applied assumptions require a more detailed analysis through Computational Fluid Dynamics (CFD) tools in order to recreate real operating conditions.

**Key words:** Ocean wave Energy; Wave Energy Converter; Wells turbine; Numerical study





## Índice

Agradecimentos.....	I
Resumo.....	III
Abstract .....	V
Índice de figuras .....	IX
Índice de tabelas .....	XI
Símbolos.....	XIII
Siglas e abreviaturas.....	XV
Introdução.....	1
Capítulo 1 Ondas oceânicas .....	3
1.1 Origem, deslocamento e rebentação.....	3
1.2 Equações de ondas lineares .....	4
1.3 Potencial das ondas no Mundo .....	7
1.4 Potencial das ondas em Portugal .....	9
Capítulo 2 Estado da Arte .....	11
2.1 Sistema de coluna de água oscilante .....	11
2.2 Pelamis .....	12
2.3 Archimedes Wave Swing .....	13
2.4 Waveroller.....	14
2.5 Wavestar.....	15
2.6 CETO .....	16
2.7 Bombora <i>mWave</i> .....	18
2.8 Delos-Reyes Morrow Pressure Device.....	19
Capítulo 3 Sistema de reservatórios compressíveis .....	21
3.1 Noções iniciais .....	21
3.2 Componentes básicas da estrutura.....	23
3.2.1 Reservatórios .....	23
3.2.2 Sonda.....	23
3.2.3 Conduta .....	24
3.3 Procedimento com orifícios originais.....	24
3.3.1 Construção e implementação dos acoplamentos .....	24
3.3.2 Equipamento <i>PASCO scientific</i> .....	25
3.3.3 Ensaio inicial .....	26
3.4 Procedimento com orifícios expandidos .....	27
3.4.1 Construção da estrutura e implementação dos orifícios expandidos .....	27
3.4.2 Ensaios <i>a seco</i> .....	28
3.4.3 Ensaios na praia.....	29
3.4.4 Potenciais melhorias.....	29

3.5 Analogia com o Delos-Reyes Morrow Pressure Device .....	30
Capítulo 4 Conceito alternativo: Wave piston .....	31
4.1 Conceito .....	31
4.2 Dimensionamento.....	32
4.2.1 Câmara-de-ar .....	32
4.2.2 Êmbolo .....	32
4.2.3 Turbina .....	35
4.2.4 Flutuador .....	36
4.3 Análise numérica.....	39
4.3.1 Forças opostas ao deslocamento do êmbolo.....	39
4.3.2 Força resultante .....	41
4.3.2.1 Condição 1: Êmbolo parado em cima .....	42
4.3.2.2 Condição 2: Êmbolo a descer com velocidade variável .....	42
4.3.2.3 Condição 3: Êmbolo a deslocar-se com velocidade constante .....	43
4.3.2.4 Condição 4: Êmbolo parado em baixo .....	43
4.3.2.5 Condição 5: Êmbolo a subir com velocidade variável .....	43
4.3.3 Geração de energia elétrica .....	44
4.3.3.1 Produção num ano de ondulação fraca.....	46
4.3.3.2 Produção num ano de ondulação forte .....	48
4.3.4 Otimização dos parâmetros .....	49
4.3.4.1 Área da base superior .....	49
4.3.4.2 Raio do êmbolo .....	51
4.3.4.3 Altura do flutuador .....	52
4.3.4.4 Coeficiente de arrasto.....	53
4.4 Modelo de grande escala .....	55
4.4.1 Fase de redimensionamento .....	55
4.4.2 Produção.....	56
4.5 Discussão de resultados.....	59
Conclusões .....	62
Referências .....	64
Apêndice A Análise dos dados de altura e período de onda na zona de Peniche/Baleal.....	66
Apêndice B Aspectos técnicos do segundo modelo.....	70
Apêndice C Algoritmo da análise numérica.....	79

## Índice de figuras

<b>Figura 1.1</b> Esquema simplificado do deslocamento de uma onda regular .....	4
<b>Figura 1.2</b> Profundidade de deslocamento da onda Vs. razão Altura/Profundidade para diferentes alturas de onda iniciais.....	6
<b>Figura 1.3</b> Estimativa da Potência Global anual média em kW/m. Fonte: ECMWF WAM model archive .....	7
<b>Figura 1.4</b> Distribuição latitudinal do potencial energético médio nos meses de janeiro (em cima) e julho (centro) e média anual (em baixo). Fonte: Ocean Wave Energy pág. 98 <sup>[13]</sup> .....	8
<b>Figura 1.5</b> Altura significativa média mensal interanual da ondulação, em metros, na zona de Peniche/Baleal .....	9
<b>Figura 1.6</b> Período médio mensal interanual da ondulação, em segundos, na zona de Peniche/Baleal. ....	10
<b>Figura 2.1</b> Esquema do funcionamento do sistema OWC. Fonte: <a href="http://energy.mit.edu">http://energy.mit.edu</a> .....	11
<b>Figura 2.2</b> Esquema de funcionamento da turbina Wells. Fonte: <a href="http://coastalenergyandenvironment.web.unc.edu">http://coastalenergyandenvironment.web.unc.edu</a> .....	12
<b>Figura 2.3</b> Sistema Pelamis. Fonte: <a href="http://buildipedia.com">http://buildipedia.com</a> .....	12
<b>Figura 2.4</b> Modos de articulação do Pelamis com vista lateral (em cima) e vista superior (em baixo). Fonte: <a href="https://www.pelamiswave.com">https://www.pelamiswave.com</a> .....	13
<b>Figura 2.5</b> Esquema de funcionamento do AWS. Fonte: <a href="https://www.researchgate.net/figure/Archimedes-Wave-Swing-by-AWS-Ocean-Energy_fig9_283368443">https://www.researchgate.net/figure/Archimedes-Wave-Swing-by-AWS-Ocean-Energy_fig9_283368443</a> .....	14
<b>Figura 2.6</b> Waveroller à superfície da água. Fonte: <a href="https://www.portal-energia.com">https://www.portal-energia.com</a> .....	14
<b>Figura 2.7</b> Esquema de funcionamento do Waveroller. Fonte: <a href="http://marinerenewableenergy.blogspot.pt">http://marinerenewableenergy.blogspot.pt</a> .....	15
<b>Figura 2.8</b> Imagem ilustrativa da estrutura Wavestar. Fonte: <a href="https://www.wearesalt.org">https://www.wearesalt.org</a> .....	15
<b>Figura 2.9</b> Esquema da estrutura de alavanca do Wavestar. Fonte: <a href="https://www.researchgate.net">https://www.researchgate.net</a> .....	16
<b>Figura 2.10</b> Imagem ilustrativa do sistema CETO. Fonte: <a href="http://www.digitaleng.news">http://www.digitaleng.news</a> .....	17
<b>Figura 2.11</b> Esquema do funcionamento do CETO. Fonte: <a href="https://www.youtube.com">https://www.youtube.com</a> .....	17
<b>Figura 2.12</b> Ilustração do Bombora mWave. Fonte: <a href="http://www.bomborawave.com/">http://www.bomborawave.com/</a> .....	18
<b>Figura 2.13</b> Esquema de funcionamento do mWave. Fonte: <a href="https://www.offshorewind.biz">https://www.offshorewind.biz</a> .....	18
<b>Figura 2.14</b> Ilustração de um conjunto de dispositivos DMP. Fonte: <a href="https://www.offshorewind.biz">https://www.offshorewind.biz</a> .	19
<b>Figura 2.15</b> Componentes do DMP. Fonte: DMP: Simple, Scalable and Submerged <sup>[27]</sup> .....	20
<b>Figura 3.1</b> Esquematisação da ideia inicial .....	21
<b>Figura 3.2</b> Colchão insuflável aplicado no sistema .....	23
<b>Figura 3.3</b> Turbina da sonda PASCO .....	23
<b>Figura 3.4</b> Secção lateral da peça de acoplamento entre o colchão e o tubo de PVC (medidas em mm) .....	24
<b>Figura 3.5</b> Secção lateral da peça de acoplamento entre o tubo e a sonda (medidas em mm) .....	25
<b>Figura 3.6</b> a) Ligação entre a peça de acoplamento e o tubo b) Ligação entre a peça de acoplamento e a sonda.....	25
<b>Figura 3.7</b> Esquema do processo de recolha de dados durante uma atividade experimental .....	26
<b>Figura 3.8</b> Ensaios a seco com os orifícios originais dos colchões .....	27
<b>Figura 3.9</b> Ligação entre o abocamento (cinzento escuro) e o aro de metal (cinzento claro) .....	27
<b>Figura 3.10</b> Esquerda: Conexão do sistema com a conduta da bomba de ar; Direita: Nova junção entre o tubo e o colchão.....	28
<b>Figura 3.11</b> Resultados dos ensaios a seco para o sistema com orifícios expandidos.....	28
<b>Figura 4.1</b> Esquema do funcionamento do conceito .....	32
<b>Figura 4.2</b> Esquerda: distâncias relevantes na análise numérica; Direita: balanço das forças para o êmbolo/flutuador parado .....	37
<b>Figura 4.3</b> Forças dependentes da velocidade do flutuador. Esquerda: Componente móvel a descer. Direita: Componente móvel a subir.....	40
<b>Figura 4.4</b> Método de resolução da força resultante. Esquerda: aceleração do flutuador. Direita: velocidade do flutuador .....	41

<b>Figura 4.5</b> Análise numérica do protótipo para N=6 ondas consecutivas com Altura H=5m e período T=15s. Em cima: Potência mecânica em kW. Em baixo: velocidade de rotação da turbina em rpm ...	44
<b>Figura 4.6</b> Input do algoritmo para o ano 2008. Em cima: Espectro de alturas significativas tri-horárias; em baixo: Espectro de períodos médios tri-horários .....	45
<b>Figura 4.7</b> Potência elétrica média tri-horária estimada para o ano 2012 .....	47
<b>Figura 4.8</b> Eficiência global média tri-horária estimada para o ano 2012.....	47
<b>Figura 4.9</b> Potência elétrica média tri-horária estimada para o ano 2009 .....	48
<b>Figura 4.10</b> Eficiência global média tri-horária estimada para o ano 2009.....	48
<b>Figura 4.11</b> Modelação da forma do flutuador e da câmara-de-ar em relação à área da base superior	50
<b>Figura 4.12</b> Curvas da potência elétrica para diferentes áreas da base superior (ano 2009) .....	50
<b>Figura 4.13</b> Curvas da eficiência global para diferentes áreas da base superior (2009).....	51
<b>Figura 4.14</b> Diversas alturas de flutuador testadas .....	52
<b>Figura 4.15</b> Perfil lateral da forma melhorada e da forma anterior do flutuador .....	53
<b>Figura 4.16</b> Modelo à escala 1:1 e modelo à escala 1:2 .....	54
<b>Figura 4.17</b> Curva da potência elétrica média tri-horária para o modelo à escala 1:1 (ano 2009) .....	56
<b>Figura 4.18</b> Curva da eficiência global média tri-horária para o modelo à escala 1:1 (ano 2009).....	56
<b>Figura A.1</b> Distribuição por classes estatísticas da altura significativa das ondas na zona de Peniche/Baleal no mês de julho.....	68
<b>Figura A.2</b> Distribuição por classes estatísticas da altura significativa das ondas na zona de Peniche/Baleal no mês de janeiro.....	68
<b>Figura A.3</b> Distribuição por classes estatísticas do período de onda na zona de Peniche/Baleal em julho .....	69
<b>Figura A.4</b> Distribuição por classes estatísticas do período de onda na zona de Peniche/Baleal em janeiro.....	69
<b>Figura B.1</b> (Em baixo) Secção lateral do Êmbolo; (Em cima) A) Anel de vedação, B) Anel estabilizador, C) Gradeamento interior do êmbolo.....	70
<b>Figura B.2</b> Turbina Wells e gerador elétrico. A) Vista frontal da turbina, B) Corte lateral do segmento da turbina, C) Vista lateral do conjunto turbina-gerado .....	71
<b>Figura B.3</b> Curvas da potência elétrica para diferentes raios do êmbolo (ano 2009) .....	72
<b>Figura B.4</b> Curvas da eficiência global para diferentes raios do êmbolo (ano 2009).....	72
<b>Figura B.5</b> Curvas da potência elétrica para diferentes distâncias entre o topo e a base do flutuador (ano 2009).....	73
<b>Figura B.6</b> Curvas da eficiência global para diferentes distâncias entre o topo e a base do flutuador (ano 2009).....	73
<b>Figura B.7</b> Curvas da potência elétrica para diferentes coeficientes de arrasto relativos ao movimento de subida (ano 2009) .....	74
<b>Figura B.8</b> Curvas da eficiência global para diferentes coeficientes de arrasto relativos ao movimento de subida (ano 2009) .....	74
<b>Figura B.9</b> Dimensões da câmara-de-ar do modelo à escala 1:1 (medidas em mm).....	77
<b>Figura B.10</b> Dimensões do flutuador do modelo à escala 1:1 (medidas em mm).....	77
<b>Figura B.11</b> Dimensões do êmbolo do modelo à escala 1:1 (medidas em mm).....	78
<b>Figura B.12</b> Dimensões do conjunto turbina-gerador para o modelo à escala 1:1 (medidas em mm). 78	
<b>Figura C.1</b> Exemplo de um ciclo de iteração usado para a estimativa da velocidade final do intervalo iterativo.....	79

## Índice de tabelas

<b>Tabela 4.1</b> Características da turbina segundo o estudo experimental de S. Shaaban e características da turbina aplicadas ao protótipo. ....	35
<b>Tabela 4.2</b> Valores mensais da potência média, energia produzida, fator de capacidade e eficiência global para a altura e período de ondulação mensal interanual .....	57
<b>Tabela 4.3</b> Potência média, eficiência global e fator de capacidade para ondas com diferentes amplitudes e o respetivo período ótimo .....	58
<b>Tabela A.1</b> Altura significativa mensal, altura significativa anual e média mensal interanual da ondulação na zona de Peniche/Baleal entre 2004 e 2013 .....	66
<b>Tabela A.2</b> Período médio mensal, período médio anual e média mensal interanual da ondulação na zona de Peniche/Baleal entre 2006 e 2013 .....	67
<b>Tabela B.1</b> Resumo das características estruturais do modelo à escala 1:2 ( $Dim = 0,65$ ).....	75
<b>Tabela B.2</b> Resumo das características estruturais do modelo à escala 1:1 ( $Dim = 0,46$ ).....	76



## Símbolos

$a_{flutuador}$	Aceleração do flutuador [ $m/s^2$ ]
$A$	Amplitude da onda [m]
$A_{bf}$	Área da base inferior do flutuador [ $m^2$ ]
$A_{bf2}$	Área da base superior do flutuador [ $m^2$ ]
$A_{c,ae}$	Área de contacto entre os anéis estabilizadores e o cilindro [ $m^2$ ]
$A_{c,av}$	Área de contacto entre o anel de vedação e o cilindro [ $m^2$ ]
$A_{tf}$	Área do topo do flutuador [ $m^2$ ]
$B$	Dureza de Brinell [Pa]
$c$	Velocidade de fase da onda [m/s]
$C_{d,DOWN}$	Coefficiente de arrasto no sentido descendente [adm]
$C_{d,UP}$	Coefficiente de arrasto no sentido ascendente [adm]
$C_T$	Coefficiente de Torque da turbina [adm]
$d$	Distância entre o nível médio da água e o fundo marinho [m]
$d_{flutuador}$	Distância vertical do topo do flutuador ao fundo marinho [m]
$d_{flutMAX}$	Distância vertical máxima do topo do flutuador ao fundo marinho [m]
$d_{flutMIN}$	Distância vertical mínima do topo do flutuador ao fundo marinho [m]
$d_{sup}$	Distância vertical entre a superfície da água e o fundo marinho [m]
$D_h$	Diâmetro do eixo da turbina [m]
$D_t$	Diâmetro da turbina [m]
$Dim$	Dimensão característica do modelo [m]
$\dot{E}$	Energia da onda por metro de largura [J/m]
$f$	Frequência da corrente alternada [Hz]
$F_a$	Força de atrito entre o êmbolo e o cilindro [N]
$F_c$	Força de contacto total entre o êmbolo e o cilindro [N]
$F_{c,ae}$	Força de contacto entre o anel estabilizador e o cilindro [N]
$F_{c,av}$	Força de contacto entre o anel de vedação e o cilindro [N]
$F_d$	Força de arrasto exercida no flutuador [N]
$F_{DOWN}$	Somatório das forças de sentido descendente [N]
$F_{pd}$	Força por baixo do êmbolo devido à queda de pressão através da turbina [N]
$F_{press}$	Força por baixo do êmbolo devido ao diferencial de pressões dinâmicas entre a secção do cilindro e o segmento da turbina [N]
$F_R$	Força resultante [N]
$F_{UP}$	Somatório das forças de sentido ascendente [N]
$FC$	Fator de capacidade do sistema electroprodutor
$h$	<i>Hub-to-tip ratio</i> (razão entre o diâmetro do eixo e das pontas da turbina Wells)
$H$	Altura da onda [m]
$H_s$	Altura significativa da onda [m]
$k$	Número de onda [rad/m]

$K$	Coeficiente de desgaste [adm]
$M_{móvel}$	Massa do conjunto êmbolo/flutuador [kg]
$NOI$	Nível de operação inferior [m]
$NOS$	Nível de operação superior [m]
$P_{bf}$	Pressão hidrostática por baixo da base inferior do flutuador [Pa]
$P_{bf2}$	Pressão hidrostática por baixo da base superior do flutuador [Pa]
$P_c$	Pressão de contacto entre o êmbolo e o cilindro [Pa]
$P_{max}$	Pressão hidrostática máxima teórico sobre o êmbolo [Pa]
$P_{elec}$	Potência elétrica do gerador [kW]
$P_{mec}$	Potência mecânica do rotor [kW]
$P_{nom}$	Potência nominal do gerador elétrico [kW]
$P_{tf}$	Pressão hidrostática por cima do topo do flutuador [Pa]
$R_{emb}$	Raio do êmbolo [m]
$R_t$	Raio da turbina [m]
$RPM$	Velocidade de rotação da turbina [rpm]
$t$	Tempo de análise de N ondas [s]
$T$	Período da onda [s]
$U_t$	Velocidade de rotação da ponta das pás [m/s]
$v_{flutuador}$	Velocidade vertical do flutuador [m/s]
$V_x$	Velocidade do fluxo de ar incidente no primeiro plano do rotor da turbina [m/s]
$\Delta p_0^*$	Coeficiente de queda de pressão através da turbina [adm]
$\Delta t$	Intervalo de tempo iterativo [s]
$\Delta z$	Distância vertical entre o topo e a base inferior do flutuador [m]
$\Delta z_2$	Distância vertical entre a base inferior e superior do flutuador [m]
$\varepsilon_{global}$	Eficiência global do processo de conversão da energia das ondas [%]
$\eta$	Eficiência aerodinâmica da turbina [%]
$\eta_G$	Eficiência média do gerador elétrico [%]
$\lambda$	Comprimento de onda [m]
$\mu_c$	Coeficiente de atrito cinético [adm]
$\mu_e$	Coeficiente de atrito estático [adm]
$\rho$	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Solidez do rotor [adm]
$T$	Binário mecânico do rotor [N · m]
$\phi$	Coeficiente de fluxo [adm]
$\omega$	Frequência angular da onda [rad/s]
$\omega_t$	Velocidade angular da turbina [rad/s]



## **Siglas e abreviaturas**

**AWS** – Archimedes Wave Swing

**CFD** – Computational Fluid Dynamics

**DMP** – Delos - Reyes Morrow Pressure Device

**LCOE** – Levelized Cost Of Energy

**NOI** – Nível de Operação Inferior

**NOS** – Nível de Operação Superior

**OTEC** – Ocean Thermal Energy Conversion

**OWC** – Oscillating Water Column

**PMSG** – Permanent Magnet Synchronous Generator

**RE** – Renewable Energy

**WavEC** – Wave Energy Centre

**WEC** – Wave Energy Converter

**WS** – Wave Star



## Introdução

A Terra representa atualmente um lar para mais de 7 mil milhões de pessoas e milhares de espécies de seres vivos que, de forma direta ou indireta, se encontram sob a nossa responsabilidade, tendo em conta as ações e decisões que tomamos diariamente e que podem ter repercussões negativas nos diversos ecossistemas. As noções de mudança climática e aquecimento global deverão, nos dias de hoje, ser intrínsecas e inquestionáveis para qualquer cidadão pertencente a uma sociedade consciente e que pretenda usufruir dos recursos finitos de que a Terra dispõe.

Quando se fala de desenvolvimento sustentável, é natural incluir-se os hábitos de consumo de energia elétrica nos diversos sectores: Transportes, Indústria, Residências, Comércio, entre outros. A eletricidade, que constitui um bem essencial e indispensável na sociedade moderna é, ainda muitas vezes, obtida pela exploração e combustão de fontes fósseis como o carvão, o petróleo e o gás natural. Estes processos, como já é sabido, apesar da sua simplicidade e baixo custo, apresentam consequências ambientais desastrosas que podem ser irreversíveis. Acontecimentos marcantes como a crise petrolífera dos anos 70, desastres associados a centrais nucleares e o aquecimento global, conduziram à crescente consciência de que uma mudança de paradigma, face à sustentabilidade, é imprescindível para o ser humano continuar a usufruir dos recursos da Terra a longo prazo. Assim intensificou-se o investimento em fontes de energia renováveis (RE).

A Terra dispõe de um amplo leque de ofertas de energia limpa e renovável. A energia hídrica constitui o mais antigo modo de aproveitamento deste género apresentando, atualmente, uma grande parte da produção elétrica por fontes de RE e mais de 16% da geração global de eletricidade, a custos competitivos com as fontes convencionais <sup>[1]</sup>. A eletricidade a partir de energia eólica começou a expandir-se notavelmente há poucas décadas, representando o segundo maior produtor elétrico de entre as RE <sup>[2]</sup>. O Sol irradia diariamente a superfície da Terra com energia suficiente para satisfazer várias vezes o consumo elétrico diário de toda a Humanidade. As tecnologias que permitem o seu aproveitamento são tornadas cada vez mais eficientes, assistindo-se atualmente a um decréscimo dos preços no setor da energia fotovoltaica <sup>[3]</sup>.

A tendência das RE tem sido de crescimento face à produção de eletricidade por fontes não-renováveis, totalizando 24,5 % da eletricidade mundial produzida em 2016 <sup>[4]</sup>. A produção através de fontes renováveis é caracterizada por variações diárias, anuais e interanuais. É possível estimar o *output* elétrico com uma certa previsibilidade, compensando a produção insuficiente gerada a partir de uma determinada fonte com a produção ou reserva (no caso de armazenamento) acentuada de outra, ou complementando ainda com as centrais convencionais.

Para um determinado lugar, se nos for possível recorrer a diversas fontes de energia renovável, cada uma com a sua ocorrência característica no tempo e uma certa previsibilidade, seremos capazes de gerir de melhor forma a variabilidade temporal descrita anteriormente, assegurando garantia de potência para a rede elétrica nesse mesmo lugar e em qualquer instante. Em suma, quanto mais diversificada for a oferta de fontes de energia renovável, melhor.

Existe um ramo que atualmente ainda se encontra em desenvolvimento, mas que aparenta ter um potencial enorme: a energia dos oceanos. Os oceanos ocupam mais de 70 % da superfície do Globo apresentando uma área vasta com dinâmica complexa e características que permitem a exploração de energia de diversas formas:

- Vento *offshore*: o potencial eólico dos oceanos é superior ao potencial em terra. Isto deve-se à orografia plana da água que praticamente não constitui obstáculo ao vento - desta forma a camada limite atmosférica desenvolve-se mais depressa no mar. Como consequência, para altitudes mais

reduzidas, o vento atinge velocidades mais acentuadas do que em terra o que, por sua vez, permite a instalação de turbinas com um fator de capacidade maior.

- Gradiente de temperatura: as tecnologias OTEC (*Ocean Thermal Energy Conversion*) aproveitam o diferencial de temperatura entre águas superficiais e profundas. A água quente à superfície é bombeada através de um permutador de calor. Aqui, o calor é transferido para um fluido de trabalho (com ponto de ebulição mais baixo e pressão de vapor mais elevada do que a água), o que provoca a sua evaporação. O vapor é expandido numa turbina que, ligada a um gerador, produz eletricidade. O fluido de trabalho é depois encaminhado para um segundo permutador que se encontra em contacto com a água fria que é bombeada de zonas mais profundas, permitindo a sua condensação e reaproveitamento <sup>[5]</sup>.
- Marés: a conversão energética é possibilitada a partir da construção de diques em estuários. Estes fazem uso da energia potencial resultante da diferença de alturas entre o nível da bacia do estuário e o nível variável das águas do mar <sup>[6]</sup>.
- Correntes oceânicas: as turbinas que se localizam no oceano extraem a energia das correntes. O potencial destas tecnologias é fortemente dependente da velocidade, uma vez que a potência varia com o cubo desta grandeza. Uma vantagem de aproveitamentos deste género é a maior previsibilidade de correntes marítimas, em comparação, por exemplo, com o vento. Inclusivamente, apesar da velocidade mais reduzida das correntes oceânicas, a densidade da água é muito superior à do ar o que se traduz numa densidade energética mais acentuada <sup>[7]</sup>.
- Ondas: apresentam um dos maiores potenciais energéticos dos oceanos, estimado superior a 8 000 TWh/ano (Roteiro EI-ERO pág. 26 <sup>[8]</sup>). As tecnologias aplicadas aproveitam o movimento oscilatório e periódico das ondas a partir de objetos oscilantes, sistemas de coluna de água fixos ou flutuantes óleo-hidráulicos. No caso de objetos oscilantes a energia é obtida através de uma turbina que transmite potência a um veio sob a forma de binário e velocidade de rotação. No caso de sistemas de coluna de água fixos ou flutuantes óleo-hidráulicos, o movimento oscilatório gera pressão para um caudal de um determinado fluido que, por sua vez, aciona um ou vários motores hidráulicos (Roteiro EI-ERO pp. 26-28, 43-45 <sup>[8]</sup>).

Globalmente, estima-se que o potencial energético combinado de ondas, marés, correntes, gradientes de salinidade e temperatura se encontre na ordem dos 32 000 TWh/ano, o que representa aproximadamente o dobro da energia elétrica consumida mundialmente no ano 2008 (17 000 TWh) <sup>[9]</sup>. Mesmo assim, a capacidade instalada ainda é diminuta (e raramente com ligação à rede elétrica). Muitos dispositivos ainda se encontram em fase de teste e desenvolvimento de forma a melhorar a razão custo-benefício e a resistência às condições turbulentas. Enquanto estes fatores não forem suficientemente vantajosos, o incentivo à instalação nunca será significativo pois trata-se de tecnologias caras que, até agora, não se mostram competitivas com as fontes renováveis tradicionais, em termos de eficiência de conversão energética e viabilidade económica.

Tendo em conta este recurso pouco explorado, mas de elevado potencial, o objetivo central desta dissertação consistiu em estudar e desenvolver métodos de aproveitamento da energia das ondas. A ideia inicial, que serviu de ponto de partida, foi uma estrutura com dois reservatórios deformáveis e uma estrutura central contendo uma turbina: no Capítulo 3 será aprofundada a descrição.

O recurso de interesse para este trabalho consistiu na dinâmica das ondas, abordada com maior detalhe nos capítulos que se seguem. No Capítulo 1 será feita uma descrição breve do recurso em causa e referência às teorias envolvidas no ramo da física das ondas. Um resumo das tecnologias mais interessantes neste setor irá ser apresentado no Capítulo 2, passando então ao desenvolvimento teórico e teórico-prático de um modo de aproveitamento energético das ondas nos Capítulos 3 e 4.

## Capítulo 1 Ondas oceânicas

O contacto mais comum que se tem com as ondas oceânicas é observar a sua rebentação na praia. As ondas podem apresentar-se desorganizadas e com dimensões reduzidas, atingindo a costa de forma serena – neste caso são criadas pela ação de ventos locais de pouca intensidade e duração. Porém, em outras ocasiões, a ondulação surge com grande amplitude, tornando-se em paredes extensas com carácter destrutivo. Ondas deste género transportam vastas quantidades de energia, a qual só poderá ser eficientemente aproveitada após uma análise detalhada do recurso que a suporta. Neste capítulo serão caracterizadas estas ondas, desde a sua origem até ao seu potencial energético no momento da chegada à costa, com particular foco na situação de Portugal.

### 1.1 Origem, deslocamento e rebentação

A radiação que é transmitida pelo Sol e que incide na superfície dos mares e oceanos, provoca a deslocação de camadas de ar atmosféricas, como consequência do restabelecimento de equilíbrio térmico. Os ventos daqui resultantes podem variar desde brisas fracas de pequena duração, até tempestades que se prolongam durante horas ou dias. Proporcionalmente variáveis, serão as dimensões das ondas geradas.

Esta situação é comparável a uma pedra que é lançada para o centro de um lago. O resultado, são pequenas perturbações à superfície que se espalham em todas as direcções até se dissiparem em terra firme. Se aumentarmos consideravelmente o tamanho da pedra lançada, as perturbações resultantes terão maior amplitude e comprimento e deslocar-se-ão a velocidades mais elevadas – em escala oceânica, esta segunda pedra será então equivalente a um vento mais forte e abrangente.

Em geral, podemos distinguir dois tipos de ondas oceânicas causadas por ventos: as vagas e os *swells*. As vagas são o resultado de vento local. Dissipam rapidamente a sua energia e altura a partir do momento em que deixam de estar ao alcance da força que as gerou, devido à tensão de superfície da água calma pela qual se deslocam. No entanto, se as condições forem propícias, a energia obtida é suficiente para a onda atravessar várias centenas ou mesmo milhares de quilómetros até atingir a costa – neste caso estamos perante um *swell*. As características ideais, das tempestades responsáveis pela sua formação dependem, essencialmente, de três fatores: duração do vento numa determinada direcção, área varrida pelo vento, tipicamente designada por *fetch*, e velocidade do vento. Quanto maiores forem estas grandezas, maiores serão as ondas em termos de amplitude e período.

Ainda dentro do alcance da tempestade, as ondas de vento apresentam-se desordenadas e em constante choque umas com as outras. Aqui existe a possibilidade de se combinarem, originando ondas com alturas e velocidades maiores, que acabam por escapar da área de influência do vento em direcção a águas menos agitadas - ou seja, ondas de vaga constituem a base para um *swell*. À medida que a tempestade acalma, os ventos tornam-se menos intensos, criando ondas mais lentas e de menores dimensões o que, por sua vez, resulta em *swells* menos energéticos.

As ondas com mais energia deslocam-se a velocidades superiores do que ondas com menos energia, ultrapassando as mais lentas durante a sua viagem. O período e o comprimento de onda são proporcionais à energia transportada. Em geral, uma onda com período igual ou superior a 15 segundos não encontra nenhum obstáculo suficientemente forte (para além da própria tensão da superfície da água) que lhe retire energia em quantidades significativas. Isto é possível uma vez que *swells* de grandes dimensões transportam energia até várias centenas de metros de profundidade enquanto se deslocam em águas profundas. À medida que a distância percorrida aumenta, *swells* com velocidades praticamente iguais agrupam-se para formar conjuntos bem definidos.

Quanto mais perto da costa se formarem estas ondas, menos definidos serão os grupos resultantes, pois não haverá tempo suficiente para formar grupos grandes e consistentes. Quando as ondas passam a deslocar-se em regime de águas pouco profundas, começam a interagir com o fundo marinho e a dissipar gradualmente a sua energia. Durante a chegada à costa, as ondas que constituem o mesmo grupo passam a ter amplitudes muito semelhantes e a velocidade de cada onda singular passa a ser a mesma tornando-se na velocidade de grupo; a altura começa a aumentar à medida que a energia de cada onda, que até agora se encontrava maioritariamente em profundidade, passa a concentra-se cada vez mais à superfície. A uma certa altura, a razão entre profundidade e amplitude da onda é tal que a crista desta colapsa devido ao próprio peso, dispersando-se de forma turbulenta <sup>[10]</sup>.

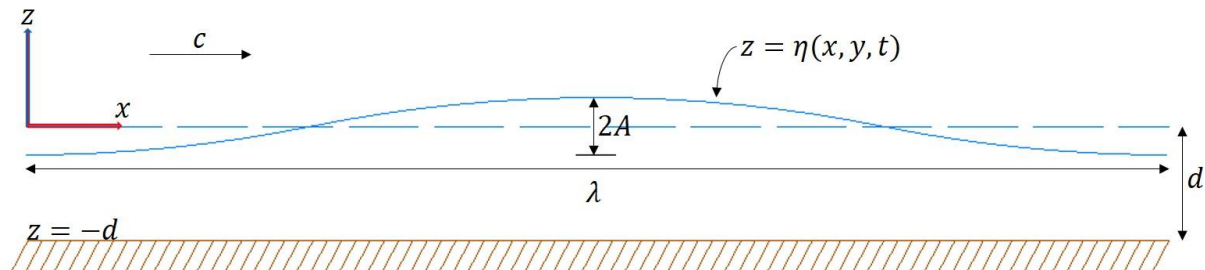
Em regime de águas pouco profundas, mais precisamente na zona de rebentação das ondas, as leis que envolvem a teoria de ondas lineares deixam de ser válidas e a análise individual de cada onda torna-se muito complexa.

## 1.2 Equações de ondas lineares\*

Na física das ondas marítimas, os até agora referidos *swells* são também designados por ondas de superfície gravíticas, uma vez que a força de gravidade atua como força de restituição responsável pelo seu movimento prolongado. Para começar a caracterizá-las, é necessário definir três grandezas elementares: o comprimento de onda ( $\lambda$ ), o período ( $T$ ) e a amplitude ( $A$ ).

O comprimento de onda (em metros) corresponde à distância mínima entre dois pontos da superfície de água que se encontrem nas mesmas condições, por exemplo, a distância entre duas cristas sucessivas; o período de uma onda (em segundos) equivale ao tempo que decorre até que todo o comprimento dessa mesma onda tenha passado por um determinado ponto; a amplitude (em metros) é igual a metade da altura da onda, ou seja, metade da distância vertical entre o vale e a crista da onda.

Uma onda oceânica desloca-se, tipicamente, a uma velocidade  $c$  num meio com profundidade  $d$ , como se encontra representado na Figura 1.1.



**Figura 1.1** Esquema simplificado do deslocamento de uma onda regular

Para esquematizar o movimento da onda usa-se um referencial cartesiano, onde o eixo positivo  $z$  aponta para cima e cuja origem coincide com a superfície da água na ausência de ondas. Os eixos  $x$  e  $y$  são horizontais e paralelos ao nível médio da água do mar. Supõe-se um fundo oceânico de profundidade constante  $d$ . Na presença de ondas, a superfície da água está localizada na posição  $z = \eta(x, y, t)$  onde  $t$  é o tempo. Introduzem-se agora mais duas grandezas recorrentes: a frequência angular ( $\omega$ ) e o número de onda ( $k$ ). A primeira representa o número de ondas abrangidas por unidade de tempo e relaciona-se com o período, da seguinte forma:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} [\text{rad/s}] \quad (1.1)$$

\* As equações desta secção baseiam-se no documento de Rick Salmon, *Introduction to Ocean waves* (2015) <sup>[11]</sup>

Por sua vez, o número de onda representa a quantidade de ondas abrangidas por unidade de comprimento, associando-se ao comprimento de onda através de:

$$|k| = \frac{2\pi}{\lambda} [\text{rad/s}] \quad (1.2)$$

Note-se que o número de onda tem sinal negativo quando a onda se move para a esquerda e sinal positivo quando se move para a direita do referencial. Considerar-se-á sempre que o deslocamento se dá no sentido dos valores positivos de  $x$ , pelo que  $k > 0$ .

A velocidade de fase ( $c$ ), à qual uma onda individual se propaga, é dada pela razão:

$$c = \frac{\omega}{k} [\text{m/s}] \quad (1.3)$$

Para tornar as teorias seguintes válidas, parte-se do pressuposto que a amplitude da onda é muito reduzida, em comparação com o seu comprimento, ou seja,  $Ak \ll 1$ . Nestas condições, em termos oceanográficos, fala-se de ondas lineares. Uma outra restrição importante é que as ondas não são forçadas nem dissipadas por ondas ou ventos de sentido oposto (*ondas livres*). Estas duas propriedades descrevem, em boa aproximação, o movimento do *swell* entre a sua geração em alto-mar e a dissipação em águas pouco profundas. Uma onda singular arbitrária, independentemente do meio em que se propaga, pode ser descrita por:

$$\eta = A \cos(kx - \omega t) \quad [\text{m}] \quad (1.4)$$

É, no entanto, a relação de dispersão (equação 1.5) que indica tratar-se de uma onda marítima. A relação de dispersão relaciona a frequência angular com o número de onda e a profundidade da água na qual ela se movimenta.

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kd)} \quad [\text{rad/s}] \quad (1.5)$$

Nesta equação,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  corresponde à aceleração gravítica e  $\tanh(s) = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}}$  é a função da tangente hiperbólica.

A partir das equações anteriores é possível definir um vasto conjunto de resultados que se aplicam ao deslocamento de ondas em águas profundas ou em pouca profundidade. Neste estudo, só irão interessar as equações para ondas em águas pouco profundas uma vez que se pretende estudar e desenvolver conceitos para aplicações nesta zona. Neste caso, a posição da superfície da água, a frequência angular e a velocidade de fase da onda são respetivamente dados por:

$$\eta = A \cos(\omega t) \quad [\text{m}] \quad (1.6)$$

$$\omega = k\sqrt{gd} \quad [\text{rad/s}] \quad (1.7)$$

$$c = \sqrt{gd} \quad [\text{m/s}] \quad (1.8)$$

A energia total por metro de largura de onda é dada por:

$$\dot{E} = \frac{1}{2} \rho g A^2 \lambda \quad [\text{J/m}] \quad (1.9)$$

No caso de ondas a deslocarem-se em águas de reduzida profundidade, verifica-se que:

$$A(x)^2 \sqrt{gd(x)} = \text{constante} \quad (1.10)$$

Durante a aproximação à costa, a amplitude de uma onda varia de tal forma que obedece à proporcionalidade:

$$A(x) \propto \frac{1}{\sqrt[4]{d(x)}} \quad (1.11)$$

À medida que se dá a dissipação da energia devido à interação com o fundo marinho, sucede-se o *empolamento* da onda, ou seja, a amplitude aumenta enquanto o comprimento diminui. Quando é atingida uma amplitude crítica, a onda desaba sobre si própria transformando a sua energia em energia cinética turbulenta.

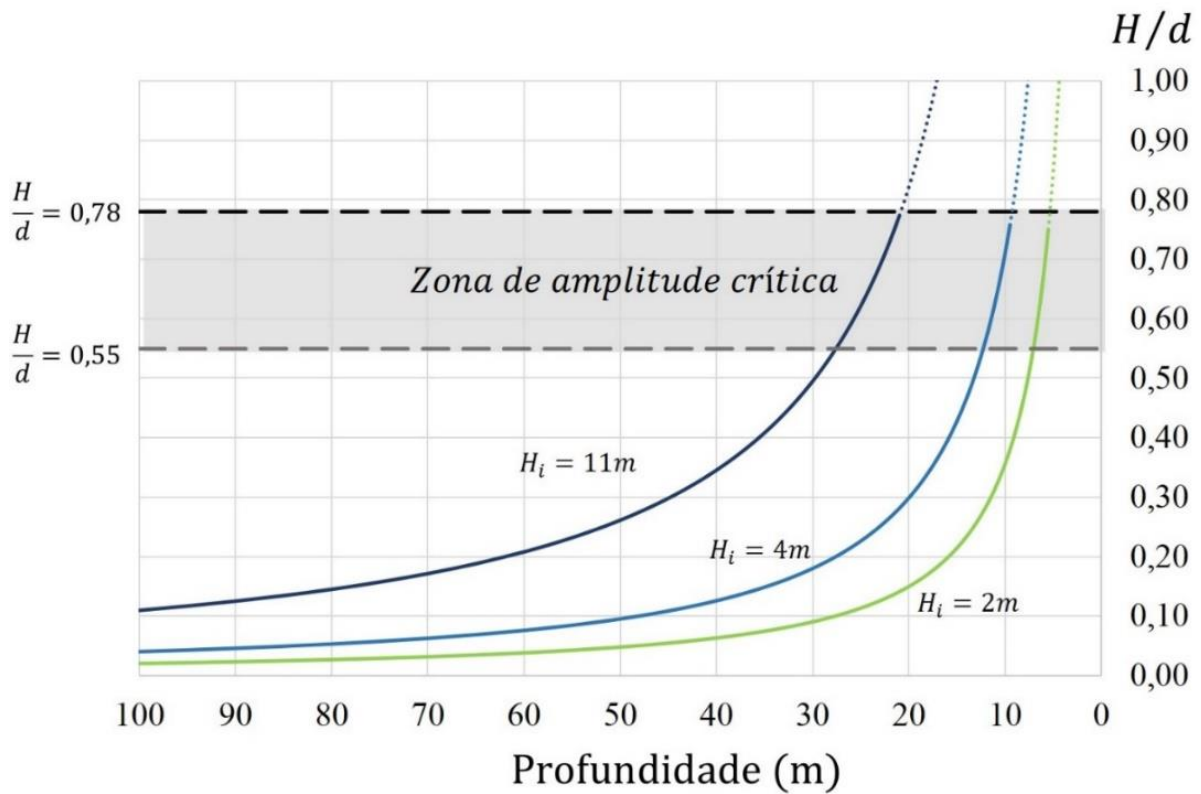
Frequentemente, considera-se o limite de amplitude:

$$2A = 0,78d \Leftrightarrow \frac{H}{d} = 0,78 \quad (1.12)$$

No entanto existem também resultados experimentais que atribuem o valor aproximado <sup>[12]</sup>:

$$\frac{H}{d} = 0,55 \quad (1.13)$$

Por hipótese, poder-se-á definir uma zona de deslocamento da onda na qual a amplitude é crítica. Tendo em conta a proporcionalidade descrita em 1.11:



**Figura 1.2** Profundidade de deslocamento da onda Vs. razão Altura/Profundidade para diferentes alturas de onda iniciais



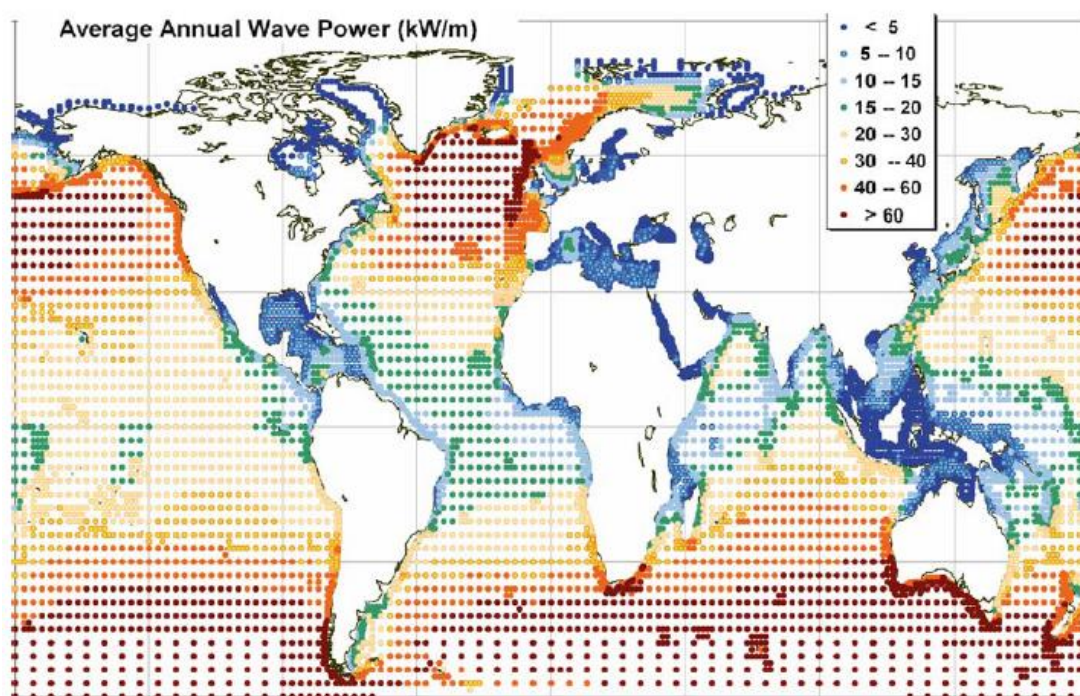
Estes limites resultam de várias análises complexas em tanques de ondas e observações de situações reais e dependem de parâmetros tais como:

- A relação entre a altura e o comprimento da onda, ou seja, a forma do perfil lateral da onda quando esta passa a deslocar-se em regime de águas pouco profundas;
- O declive do fundo marinho: para declives muito reduzidos ou fundos aproximadamente horizontais, tipicamente  $declive < \frac{1}{250}$ , a razão limitante costuma ser a menor, indicada na equação 1.13, enquanto que para declives iguais ou superiores a  $\frac{1}{100}$  a maior razão limitante da equação 1.12 tende a apresentar validade superior;
- Condições de vento favorável ou desfavorável ao sentido de propagação da onda.

Na Figura 1.2 a altura inicial  $H_i$  foi deduzida atribuindo um valor arbitrário à *constante numérica* da equação 1.10. Esta constante resulta das diversas características de uma onda (período, altura e comprimento de onda). Com altura inicial designa-se a altura que a onda possui quando se inicia a transição de águas profundas para águas de pouca profundidade: neste caso, optou-se pela profundidade de 100 m, negligenciando os valores anteriores a esta profundidade, supondo uma amplitude constante. Observa-se que a rebentação é tanto mais retardada quanto menor for a altura da onda no início da dissipação energética. Conclui-se daqui que, em prol do aproveitamento de uma maior gama de ondas, nomeadamente ondas que transportam mais energia, é necessário instalar um sistema de conversão de energia anteriormente à zona de rebentação proposta pela Figura 1.2 (cerca de 20 metros de profundidade). Após este limite, um conversor de energia das ondas poderá deparar-se com situações de maior turbulência, devido à rebentação mais frequente das ondas.

### 1.3 Potencial das ondas no Mundo

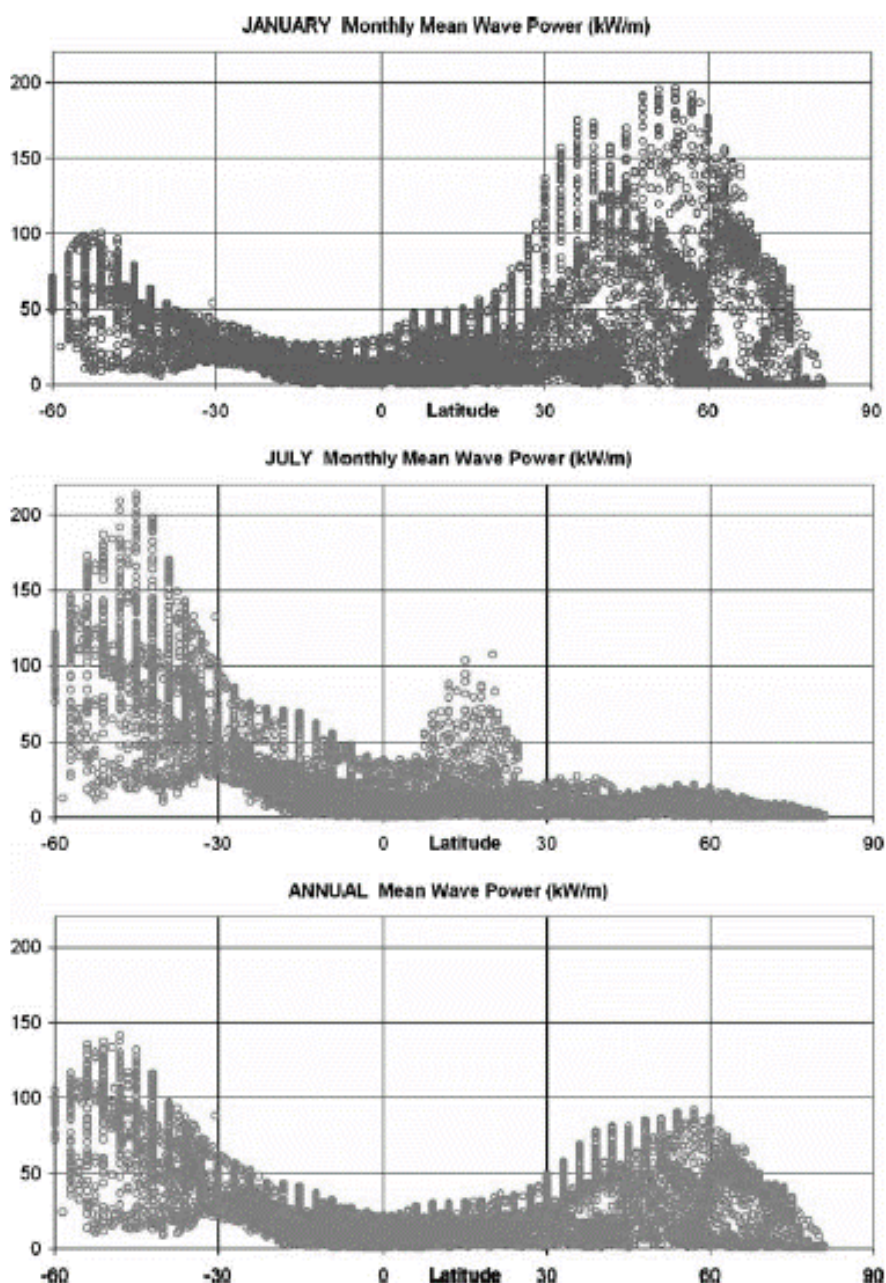
Uma estimativa do potencial energético das ondas é importante, quando se pretende escolher um sítio propício para a instalação de um aproveitamento energético deste recurso. O mapa da Figura 1.3 representa o potencial anual médio das ondas em todo o globo, em kW por metro de largura de onda, baseado em registos obtidos ao longo de 10 anos.



**Figura 1.3** Estimativa da Potência Global anual média em kW/m. Fonte: ECMWF WAM model archive

Verificam-se duas zonas bem delimitadas onde a oferta anual de energia é mais acentuada: entre as médias e altas latitudes, nas zonas de tempestades de clima temperado nos dois hemisférios, nomeadamente, entre os 40° e 60°.

Na Figura 1.4 encontra-se representado o potencial médio, por latitudes, nos dois meses durante os quais se observam os valores médios mínimos e médios máximos anuais (Janeiro e Julho) em cada hemisfério.



**Figura 1.4** Distribuição latitudinal do potencial energético médio nos meses de janeiro (em cima) e julho (centro) e média anual (em baixo). Fonte: Ocean Wave Energy pág. 98 <sup>[13]</sup>

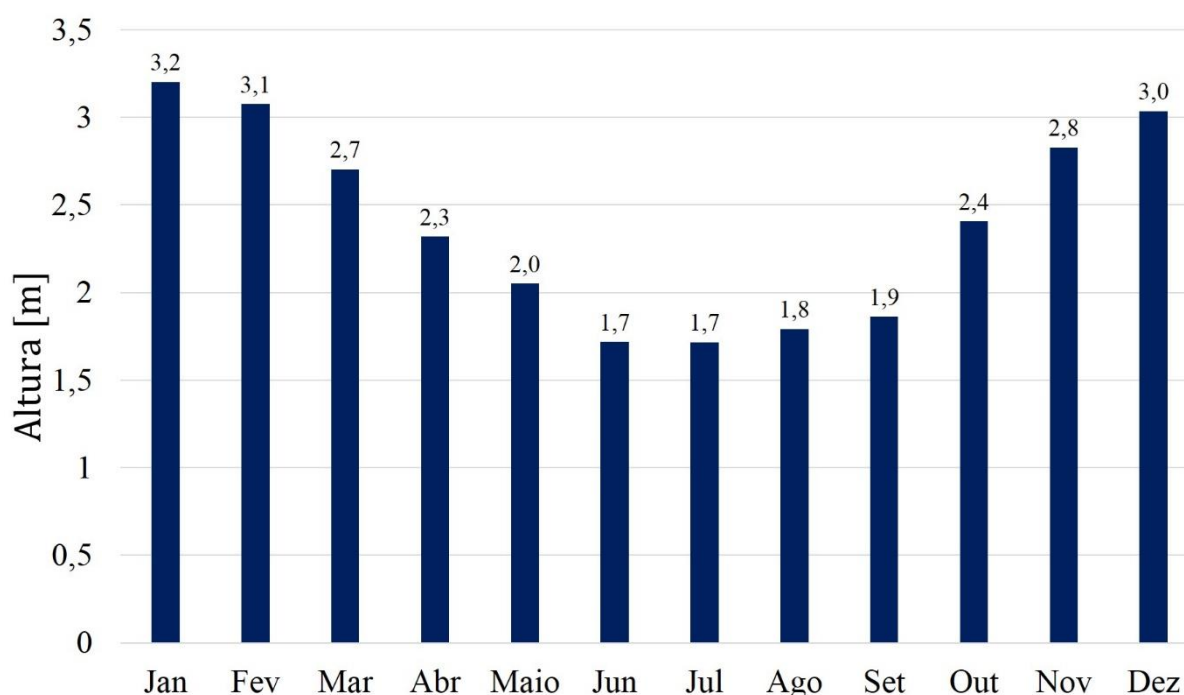
A variação máxima anual do potencial deste recurso no Hemisfério Sul (latitudes negativas) é bastante mais reduzida, com um pico de 220  $kW/m$  e mínimo de 100  $kW/m$ , para a mesma latitude. Por outro lado, no Hemisfério Norte a variação máxima encontra-se entre 25 e 200  $kW/m$ . Consequentemente, o valor máximo da estimativa da potência média anual é ligeiramente maior no Hemisfério Sul (140  $kW/m$ ) do que no Hemisfério Norte (90  $kW/m$ ).

## 1.4 Potencial das ondas em Portugal

Portugal usufrui de uma costa abrangente e a forte ondulação das praias no norte do país é caracterizada por uma disponibilidade energética anual acentuada, entre 40 e 60  $kW/m$ , como se pode observar na Figura 1.3.

As praias desde Peniche até à Nazaré são merecedoras de especial atenção, devido à forte ondulação que é conhecida mundialmente. Em termos de média anual, as ondas atingem alturas de 2,4  $m$  e períodos de 10  $s$ , porém, registam-se também valores de altura superiores a 10  $m$  e períodos que ultrapassam 15  $s$  – ondas com estas dimensões apresentam um potencial energético superior a 1  $MW/m$ .

Observando a Figura 1.5 e a Figura 1.6 identifica-se a variabilidade sazonal que foi referida anteriormente e que é típica no Hemisfério Norte: a ondulação predominantemente energética é observada nos meses de Inverno, enquanto que nos meses de Verão as águas do mar se encontram mais calmas.

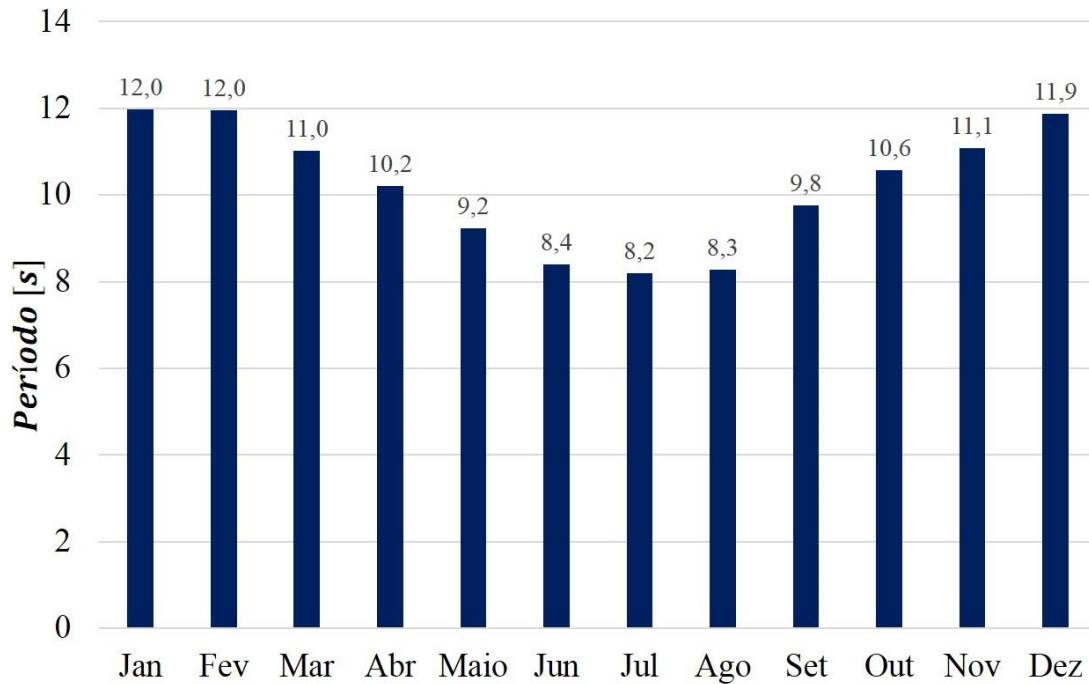


**Figura 1.5** Altura significativa média mensal interanual da ondulação, em metros, na zona de Peniche/Baleal

Comparando os valores anuais e interanuais que possibilitaram a construção destes gráficos, torna-se evidente que a variabilidade interanual deste recurso é pouco significativa \*. Desta forma é possível estimar, com uma certa previsibilidade, o *input* energético mensal e anual proveniente das ondas.

Se o recurso aproveitado for a onda do tipo *swell* que, em termos energéticos, é mais atrativa do que a vaga, é também de sublinhar a sua previsibilidade a curto prazo. Tendo em conta que estas se formam a uma distância considerável da costa, podemos caracterizá-las com horas ou dias de antecedência, relativamente ao seu período, comprimento de onda e altura. Isto, por sua vez, transmite informação fundamental acerca da energia vindoura e facilita o planeamento energético.

\* Ver Análise dos dados de altura e período de onda na zona de Peniche/Baleal, pp. 68-71, para uma perspetiva mais elaborada deste recurso



**Figura 1.6** Período médio mensal interanual da ondulação, em segundos, na zona de Peniche/Baleal.

Os dados recolhidos para a altura das ondas obedecem, geralmente, a uma função de distribuição de *Rayleigh*, na forma:

$$F_H(h) = 1 - e^{-2(h/H_s)^2} \quad (1.14)$$

No âmbito da oceanografia aplica-se, frequentemente, o conceito estatístico de *Altura significativa* ( $H_s$ ) que corresponde à média do maior terço de um intervalo progressivo de dados da altura da ondulação.

No caso das ondas que chegam à costa de Peniche, para o período entre 2004 e 2013, a altura significativa corresponde a:

$$H_s = 3,7 \text{ m}$$

Assim, a partir da Equação 1.12 é possível prever, com alguma certeza que, por exemplo, 1/10 das ondas observadas nesta zona terá uma altura igual ou superior a 4 metros. Já a média da altura significativa corresponde a 2,4 metros nesta zona.

Numa primeira abordagem, as ondas apresentam-se como um vasto recurso com grande potencial para aproveitamento energético. O seu comportamento regular permite distinguir os sítios mais apropriados para a sua exploração, como na costa ocidental da América do Norte, nas zonas costeiras a Sul do continente africano, no Sul da Austrália e em todo o litoral norte-Europeu banhado pelo Atlântico. Distingue-se, inclusivamente, a vantagem da previsão antecipada das características das ondas, o que permite a conjugação com outras fontes renováveis.

Portugal em particular, com a sua costa extensa e ondulação abrangente, reúne condições propícias para o desenvolvimento e implementação de conversores energéticos das ondas.



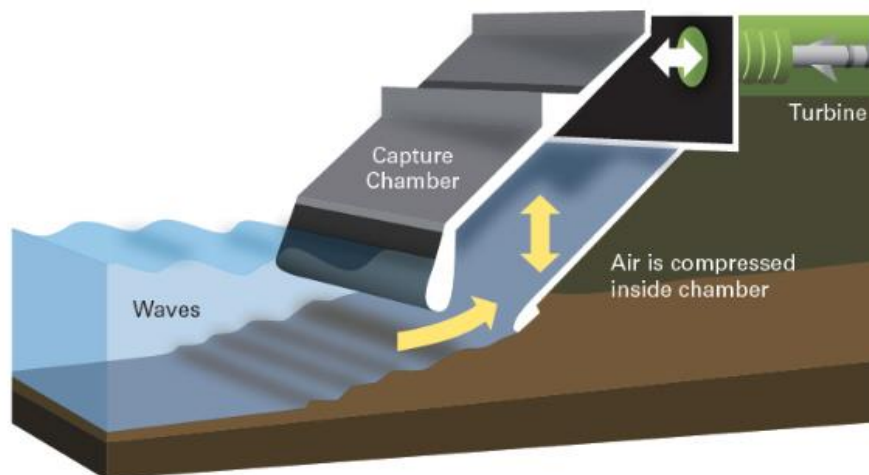
## Capítulo 2 Estado da Arte

Uma vez recolhida alguma informação introdutória acerca do recurso a estudar, será mais fácil compreender as tecnologias que pretendem convertê-lo em energia útil. Neste capítulo exploram-se alguns modelos que já foram testados, mas que requerem melhoramentos e aqueles que, até agora, aparentam ser os mais adequados para a exploração energética das ondas.

### 2.1 Sistema de coluna de água oscilante

A Central de Coluna de água oscilante (ou, como internacionalmente é conhecida – *Oscillating Water Column*, OWC) – foi construída na costa da ilha do Pico, nos Açores, como a Central piloto Europeia de energia das ondas, cofinanciada pela Comissão Europeia. Com este projeto pretendeu-se demonstrar a viabilidade técnica da energia das ondas numa pequena ilha, ligada à rede elétrica. Desde 2004, a central é operada pela associação privada WavEC (*Wave Energy Center*) e representa um investimento de 4 M€<sup>[14][15]</sup>.

O funcionamento do sistema é relativamente simples (Figura 2.1): as ondas que chegam à costa provocam a subida da água dentro de uma câmara de captação, acima do nível médio da água do mar. O ar dentro dessa câmara é, conseqüentemente, empurrado para cima e comprimido passando seguidamente por uma turbina de ar que, ligada a um gerador elétrico, produz eletricidade. Quando o nível da água dentro da câmara volta a baixar, o ar é sugado para dentro, impulsionando novamente a turbina. Para aproveitar o sentido variável do fluxo de ar, faz-se uso da turbina Wells.

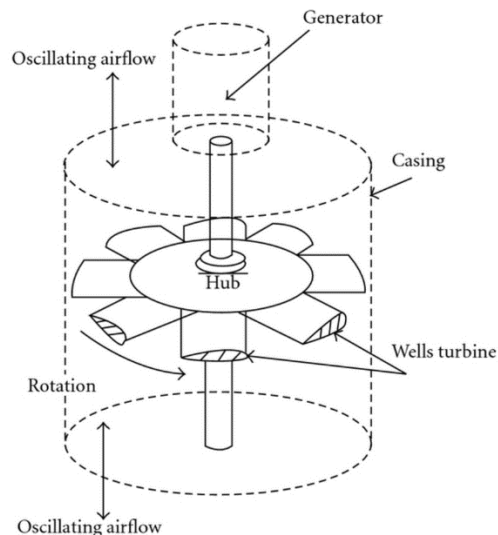


**Figura 2.1** Esquema do funcionamento do sistema OWC. Fonte: <http://energy.mit.edu>

A turbina Wells é uma turbina de ar de baixa pressão que roda continuamente na mesma direção, independentemente do sentido do fluxo de ar que a atravessa. As pás da turbina apresentam um perfil simétrico, com o eixo de simetria no plano de rotação e perpendicular à corrente de ar, como se encontra exemplificado na Figura 2.2.

Em 2010, a central do Pico (com capacidade de 400 kW) funcionou de forma ininterrupta entre setembro e dezembro, operando durante 1300 horas, com uma potência média de 40 kW<sup>[15]</sup>.

Os sistemas de coluna de água oscilante podem ser montados em parque, como foi o caso da empresa Dinamarquesa *Dexaware*, que abriu em 2011 o primeiro parque operado comercialmente, no Golfo da Biscaia, entre a costa norte de Espanha e a costa sudoeste da França. Este consiste num conjunto de 16 sistemas OWC que perfazem uma capacidade instalada de 296 kW<sup>[16]</sup>.



**Figura 2.2** Esquema de funcionamento da turbina Wells. Fonte: <http://coastalenergyandenvironment.web.unc.edu>

O princípio das OWC não se limita à aplicação em zonas costeiras. Em 2013 a companhia Australiana *Oceanlinx* concluiu a construção de uma central de coluna de água oscilante para aplicação *offshore*, em águas pouco profundas, com uma capacidade instalada de 1000 kW.

O sistema de coluna de água oscilante destaca várias vantagens: não necessita de preparação prévia do fundo marinho nem ancoragem; Não tem partes móveis submersas; é facilmente recolocável; construído para operar durante 25 anos seguidos. Porém, verificam-se também algumas desvantagens: necessidade de uma estrutura grande que causa impacto visual na costa; eficiência mais reduzida da turbina Wells face a turbinas de sentido único – isto deve-se ao elevado ângulo de ataque do fluxo de ar, o que resulta na perda de sustentação (efeito de *stall*) para velocidades elevadas do escoamento; fator de capacidade reduzido; a estrutura é alvo da forte rebentação e necessita de manutenção frequente. Um exemplo disso é a central do Pico que, após 19 anos, deverá ser alvo de desmantelamento devido ao desgaste da parte submersa e asseguramento das condições de segurança e ambientais <sup>[17]</sup>.

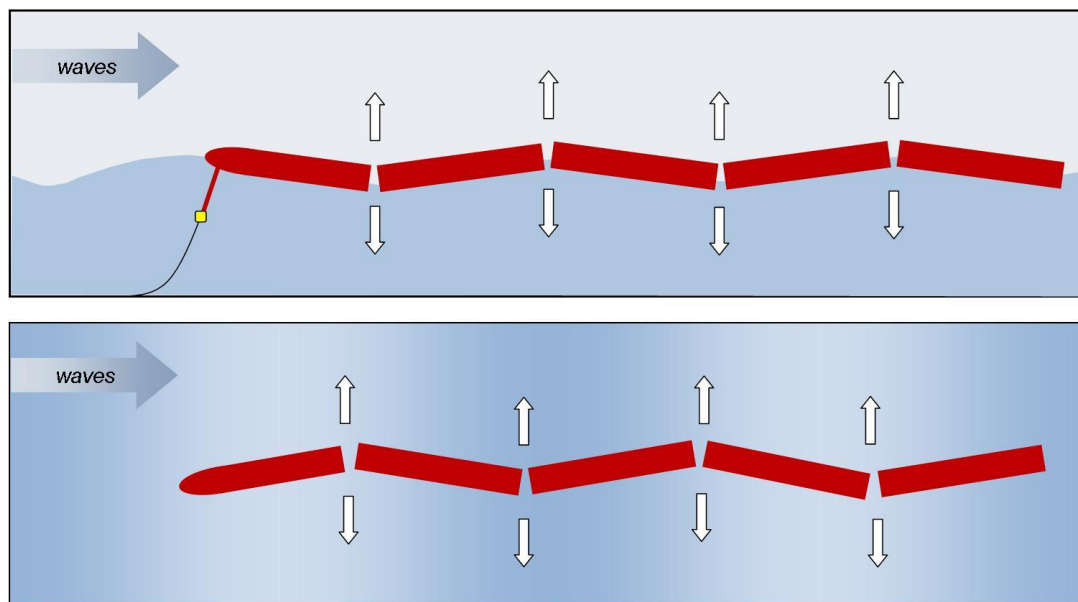
## 2.2 Pelamis

O sistema *Pelamis* foi desenvolvido pela empresa escocesa *Pelamis Wave Power*. Implementado em 2004, foi o primeiro sistema de geração de energia *offshore* dos oceanos a gerar energia elétrica para a rede no Reino Unido. Após o sucesso inicial foram inaugurados e testados mais 3 protótipos de primeira geração no parque da Aguçadoura (Portugal), em setembro de 2008 – cada dispositivo com uma potência instalada de 750 kW (Roteiro EI-ERO pág. 44 <sup>[8]</sup>).



**Figura 2.3** Sistema Pelamis. Fonte: <http://buildipedia.com>

O *Pelamis* é do tipo flutuante óleo-hidráulico, ancorado no fundo marinho e, no caso dos protótipos de segunda geração, consiste numa estrutura articulada entre 5 secções, cada secção com cerca de 30 metros de comprimento e 4 metros de diâmetro <sup>[18]</sup>. As articulações são formadas por cilindros hidráulicos que, através da oscilação das ondas (Figura 2.4), bombeiam óleo em alta pressão para motores hidráulicos. A eletricidade produzida é transferida por cabos submarinos para a costa. O investimento total para esta tecnologia rondou os 15 M€ entre 2007 e 2008 (Roteiro EI-ERO pág. 44 <sup>[8]</sup>).



**Figura 2.4** Modos de articulação do Pelamis com vista lateral (em cima) e vista superior (em baixo). Fonte: <https://www.pelamiswave.com>

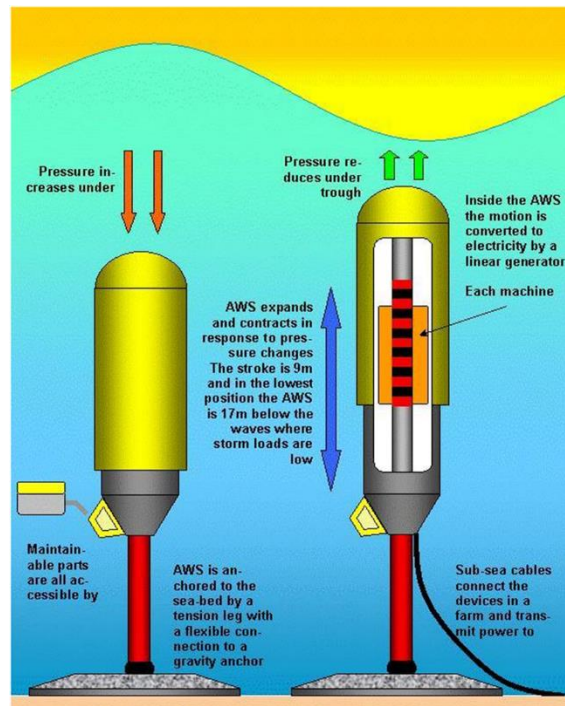
As principais desvantagens associam-se naturalmente à fragilidade face à exposição intensa a condições meteorológicas adversas à superfície da água - o dispositivo apresenta uma elevada complexidade dos sistemas mecânicos e óleo-hidráulicos e ao seu desgaste associa-se, assim, uma manutenção frequente e economicamente acentuada.

## 2.3 Archimedes Wave Swing

No final dos anos 90 a empresa Holandesa *Teamwork* desenvolveu o sistema *Archimedes Wave Swing* (AWS). Trata-se de um sistema oscilante, submerso e ancorado ao fundo marinho. É constituído por uma parte fixa e uma parte móvel, designadamente, um flutuador. O sistema faz uso de um gerador elétrico linear de ímãs permanentes: quando uma onda passa por cima do flutuador, este é empurrado para baixo, devido ao aumento de pressão (Figura 2.5, à esquerda) e volta a subir à medida que a coluna de água passa da crista para o vale da onda (Figura 2.5, à direita).

Em 2004 foi testado um protótipo (AWS III) na costa da Póvoa do Varzim com uma potência instalada de 2000 kW. Após o sucesso deste teste foi criada a empresa *AWS Ocean Energy Ltd.* na Escócia que, entre 2001 e 2004, investiu um total de 10 M€ nesta tecnologia, dos quais 2 M€ ocorreram em Portugal (Roteiro EI-ERO pp. 104, 106 <sup>[8]</sup>).

A simplicidade e fiabilidade do sistema, tornam o AWS ainda nos dias de hoje, uma alternativa de produção de energia das ondas muito promissora. No entanto, as estruturas têm grandes dimensões e operam a profundidades entre 80 a 90 metros. Como tal, terão que se encontrar afastadas da costa o que, por sua vez, implica instalar vastos comprimentos de cabos entre o sistema electroprodutor e a costa <sup>[19]</sup>.



**Figura 2.5** Esquema de funcionamento do AWS. Fonte: [https://www.researchgate.net/figure/Archimedes-Wave-Swing-by-AWS-Ocean-Energy\\_fig9\\_283368443](https://www.researchgate.net/figure/Archimedes-Wave-Swing-by-AWS-Ocean-Energy_fig9_283368443)

## 2.4 Waveroller

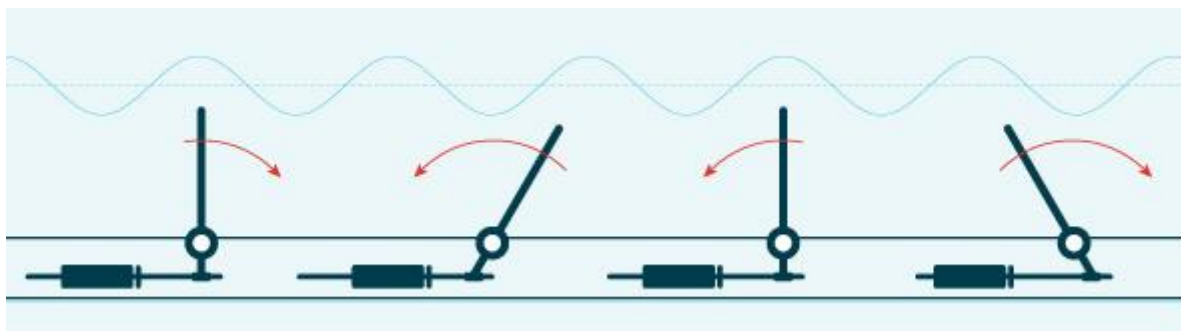
O *Waveroller* foi desenvolvido pela empresa finlandesa *AW-Energy*. Consiste numa pala submersa e móvel, fixa ao fundo marítimo, entre 8 e 20 metros de profundidade.



**Figura 2.6** Waveroller à superfície da água. Fonte: <https://www.portal-energia.com>

O movimento oscilatório da pala controla o pistão hidráulico que, ligado a um circuito hidráulico fechado, provoca o movimento de um fluido a alta pressão que é direcionado para um motor hidráulico alimentando assim um gerador elétrico (Figura 2.7). A eletricidade produzida é conduzida por cabos no fundo marítimo para uma subestação em terra. Todo o circuito encontra-se hermeticamente fechado no sistema e desta forma, separado do ambiente marítimo <sup>[20]</sup>.





**Figura 2.7** Esquema de funcionamento do Waveroller. Fonte: <http://marinerenewableenergy.blogspot.pt>

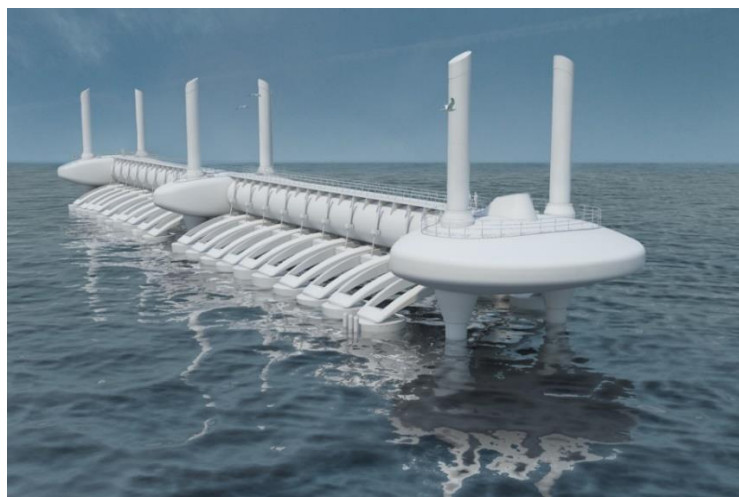
Após uma sequência de testes entre 2007 e 2008, em 2012 foi instalado um parque com três unidades *Waveroller* na costa de Peniche (projeto *Surge*), totalizando uma potência de 300 kW, embora tenha sido concedida uma licença de 1000 kW de produção para a rede elétrica em Portugal <sup>[20]</sup>.

Atualmente o projeto encontra-se encerrado e o equipamento fora de funcionamento, com resultados positivos, tanto na vertente da produção energética como também relativamente a questões ambientais. Novos protótipos melhorados estão planeados para futuras aplicações. O investimento total no sistema *Waveroller* foi de 5,7 M€ entre 2007 e 2014, dos quais 2,4 M€ foram investidos em projetos na costa portuguesa (Roteiro EI-ERO pp. 104 <sup>[8]</sup>).

As unidades *Waveroller* possuem a vantagem de estarem equipadas com tanques de lastro que podem ser enchidos com água para submergir o dispositivo. Em caso de manutenção, a água é libertada e a unidade sobe para a superfície, onde pode ser rebocada através de um barco.

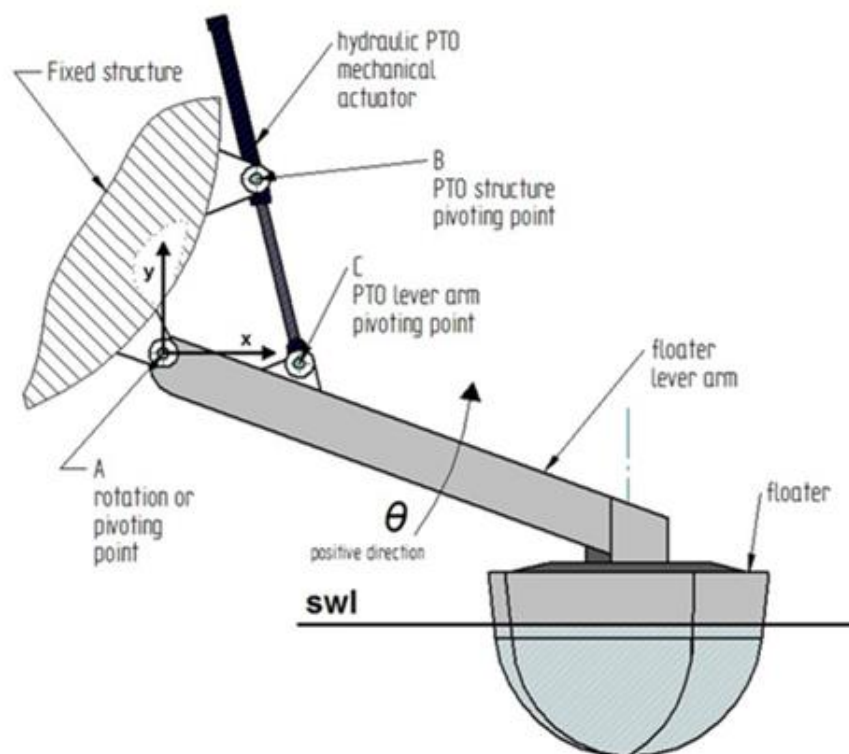
## 2.5 Wavestar

O Wavestar (WS) foi desenvolvido pela empresa dinamarquesa Wave Star Energy, em 2003. Consiste numa estrutura fixa no fundo marinho, em águas pouco profundas. A esta estrutura, encontra-se acoplada uma fila de alavancas e boias semissubmergidas (Figura 2.9) que se deslocam em sentido ascendente e descendente, à medida que as ondas passam.



**Figura 2.8** Imagem ilustrativa da estrutura Wavestar. Fonte: <https://www.wearesalt.org>

Por via hidráulica, é bombeado óleo a alta pressão a um sistema de transferência, comum a todas as alavancas. Esta pressão é aplicada num motor hidráulico que, por sua vez, opera o gerador do sistema electroprodutor. Desta forma, a energia é continuamente produzida, apesar da periodicidade das ondas <sup>[21]</sup>.



**Figura 2.9** Esquema da estrutura de alavanca do Wavestar. Fonte: <https://www.researchgate.net>

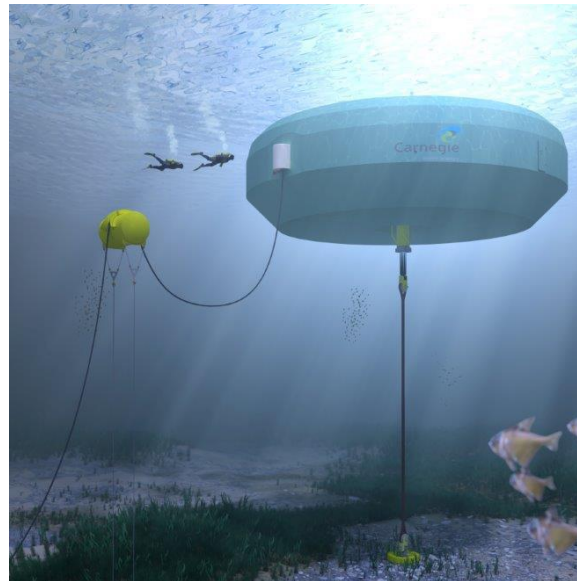
Em caso de condições adversas, nomeadamente ventos fortes ou ondas de altura muito elevada, a máquina tem a capacidade de retirar as boias da água, recolhendo as alavancas e garantindo assim a longevidade do sistema.

Após testes em tanques de ondas e simulações numéricas, foi construído e analisado um modelo à escala 1:10 – a sua aplicação foi feita em Nissum Bredning (Dinamarca) em 2006. O sistema encontrava-se equipado com 20 boias de 1 metro de diâmetro e um gerador de 5,5 *kW*. Verificou-se que a estrutura é capaz de gerar eletricidade mesmo para ondas muito pequenas, desde os 10 *cm* de altura, estimando-se que o WS produziu energia durante 90% do tempo de operação e durante 30% do tempo gerou energia à capacidade máxima. O modelo à escala 1:1 deverá estar equipado com flutuadores de 10 metros de diâmetro e um gerador de 3 *MW*.

Protótipos demonstraram também que, para dimensionamentos à escala, apropriados às características predominantes das ondas, a potência produzida aumenta cerca de 11 vezes para cada vez que o sistema duplica em tamanho <sup>[22]</sup>.

## 2.6 CETO

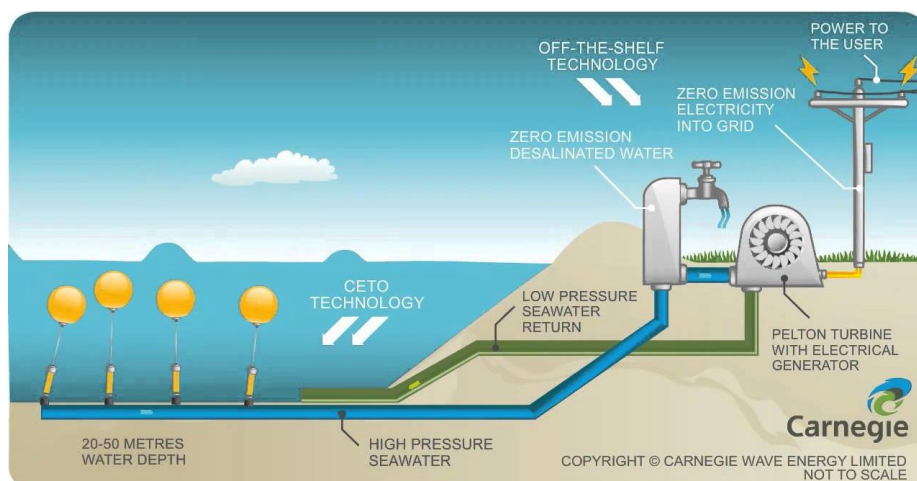
Este conversor da energia das ondas foi desenvolvido na Austrália pela empresa Carnegie. Consiste numa boia completamente submersa e ancorada ao fundo marinho. Com a passagem de uma onda, a boia é puxada no sentido de deslocação da mesma, aproveitando-se a energia cinética do swell. Um cabo extensível, ligado à boia, aciona uma bomba de água marinha que encaminha este fluido de trabalho para um gerador de turbinas hidroelétricas na costa. A água é depois devolvida ao mar a baixa pressão.



**Figura 2.10** Imagem ilustrativa do sistema CETO. Fonte: <http://www.digitaleng.news>

O diâmetro da boia, que tem um impacto significativo no desempenho do sistema, já variou desde os 7 metros nas primeiras unidades de 80 kW, até aos 11 metros no mais recente CETO 5 (ano 2015), com uma potência máxima de 240 kW. O CETO 6, com 20 m de diâmetro e potência de 1000 kW deverá incluir todas as componentes de geração elétrica dentro da própria boia, evitando-se a instalação de partes hidráulicas como as bombas de água.

Tal como se encontra representado na Figura 2.11, as gerações mais recentes de CETO, aproveitam a água do mar e a energia gerada, para transferir eletricidade diretamente para a rede e para a dessalinização de uma parte do recurso através de osmose inversa, produzindo água potável.

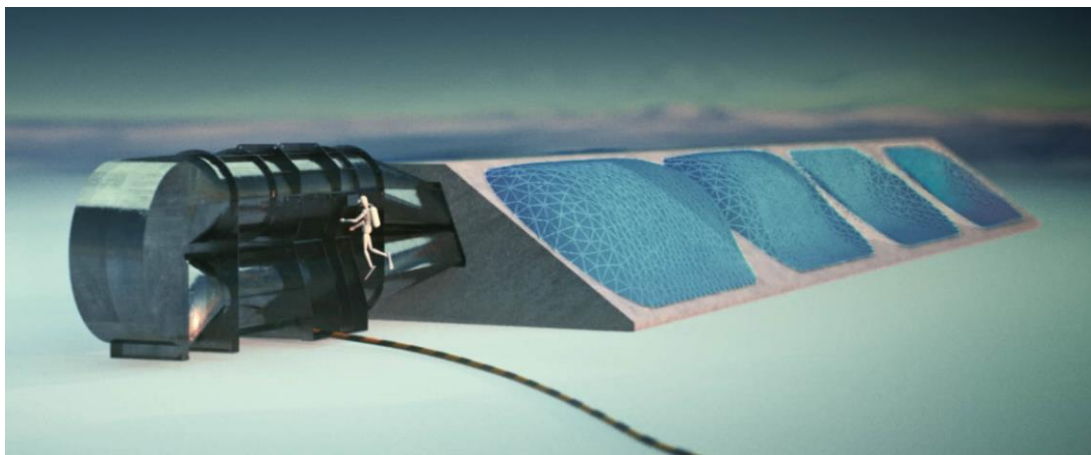


**Figura 2.11** Esquema do funcionamento do CETO. Fonte: <https://www.youtube.com>

O sistema é favorecido por várias vantagens: por operar completamente submerso não constitui impacto visual e encontra-se protegido das condições agrestes que se encontram à superfície da água; é um sistema flexível que trabalha em diversas profundidades, direções das ondas e batimetria do fundo marinho; apresenta uma alternativa eficiente e limpa para a obtenção de água doce <sup>[23]</sup>.

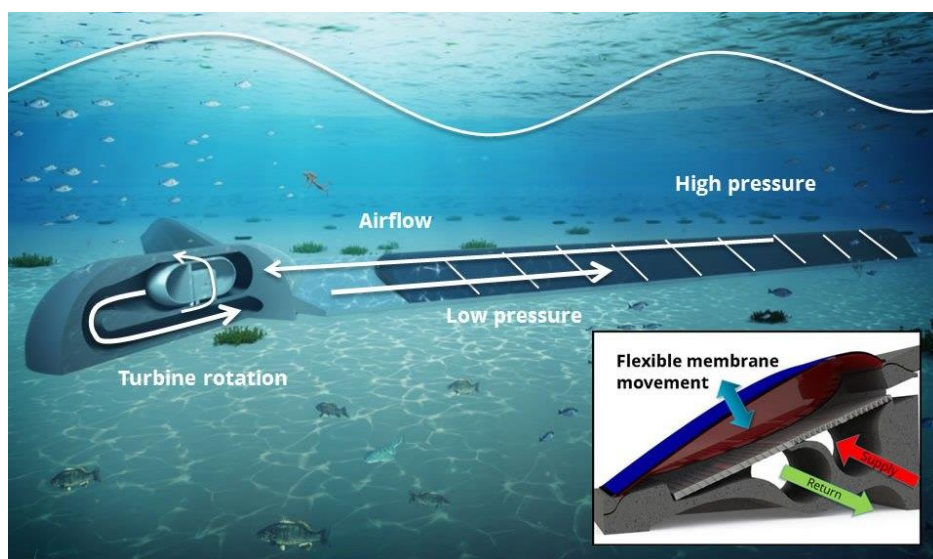
## 2.7 Bombora *mWave*

A empresa australiana Bombora Wave Power foi fundada em 2012 após obter bons resultados com o conversor de energia das ondas *mWave*, cujo conceito de funcionamento começou a ser explorado em 2007. O sistema consiste numa base em betão sobre a qual se encontram várias células de ar envoltas por uma membrana flexível de borracha (Figura 2.12).



**Figura 2.12** Ilustração do Bombora *mWave*. Fonte: <http://www.bomborawave.com/>

Quando uma onda passa das membranas compressíveis, a variação da coluna de água causa um aumento de pressão sobre os compartimentos côncavos. Desta forma o ar contido neles é deslocado através de uma conduta superior até ao segmento que contém um conjunto turbina-gerador. O *mWave* aproveita a energia pneumática através de uma turbina de ar de fluxo unidirecional. O abastecimento de ar desde as células até à conduta é controlado por válvulas de admissão, que permitem o fluxo apenas numa direção. Após a passagem da onda o ar retorna para dentro das células através de uma conduta inferior, passando por válvulas de abastecimento (Figura 2.13).



**Figura 2.13** Esquema de funcionamento do *mWave*. Fonte: <https://www.offshorewind.biz>

A eletricidade produzida pelo gerador é transportada para costa por via de cabos submarinos. Após condicionamento da potência, a energia elétrica é transferida para a rede local.



O modelo já foi testado à escala reduzida em tanques de ondas e, num futuro próximo, passará à fase de instalação e análise em zonas costeiras (Escócia, País de Gales, Austrália e Portugal). O projeto planeado para Peniche consistirá numa matriz de sistemas *mWave* com 1,5 MW e um comprimento de 60 metros por cada dispositivo. Todo o conjunto de 40 conversores totaliza 60 MW. O sistema electroprodutor, com uma extensão de 2,5 km, deverá operar à profundidade de 10 metros, a 700 metros da costa. Prevê-se um investimento superior a 120 M€<sup>[24] [25]</sup>.

## 2.8 Delos-Reyes Morrow Pressure Device

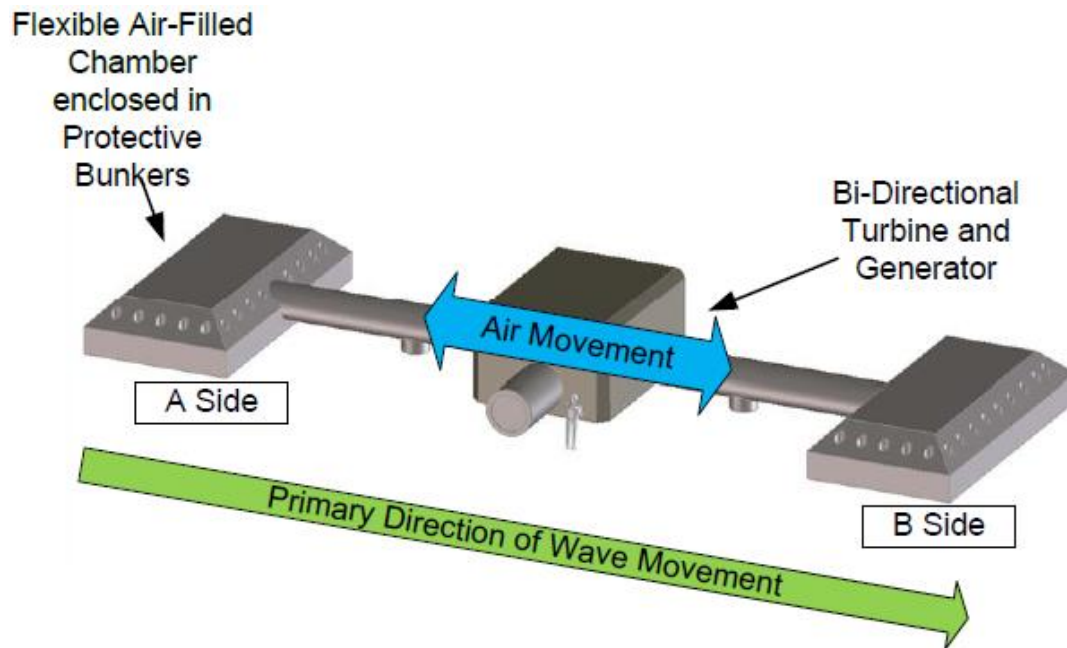
O conceito do *Delos-Reyes Morrow Pressure Device* (DMP, Figura 2.14) produzido pela empresa americana de Oregon *M3 Wave Energy Systems LCC*, surgiu no início dos anos 90. Porém, devido ao reduzido interesse e investimento nas renováveis marítimas da altura o projeto foi colocado em *standby* durante diversos anos. Com o acrescido desenvolvimento de aproveitamentos energéticos das ondas, o projeto foi retomado em 2008 encontrando-se atualmente em fase de maturidade tecnológica TRL4, com vários testes em tanques de ondas e ensaios computacionais concluídos com sucesso.



**Figura 2.14** Ilustração de um conjunto de dispositivos DMP. Fonte: <https://www.offshorewind.biz>

De forma semelhante ao Bombora *mWave*, o dispositivo é constituído por dois compartimentos de ar compressíveis interligados por um tubo que contém uma turbina de ar bidirecional no centro (Figura 2.15). Quando uma onda passa por cima do sistema gera-se uma pressão superior por cima do compartimento A, expulsando o ar deste e deslocando-o para o compartimento B, fazendo rodar a turbina. Quando a crista da onda passa por cima do segundo compartimento o diferencial de pressão provoca o deslocamento do ar no sentido contrário. Desta forma o DMP produz energia através de um fluxo de ar oscilante. Todo o sistema encontra-se dentro de uma estrutura em aço que protege as componentes no interior e serve simultaneamente de ancoragem.

Em 2014 testou-se um modelo à escala 1:5 com 9 metros de comprimento e 2,5 metros de largura, durante duas semanas, a 1,6 km da costa de Oregon numa profundidade de 15 metros. O modelo à escala 1:1 deverá ter cerca de 50 metros de comprimento e uma capacidade de 100 a 150 kW. O DMP apresenta a vantagem da escalabilidade pois absorve a energia potencial das ondas numa vasta área.



**Figura 2.15** Componentes do DMP. Fonte: DMP: Simple, Scalable and Submerged <sup>[27]</sup>

Vários dispositivos podem ser instalados perto uns dos outros o que permite uma elevada densidade de captação de energia das ondas. Na teoria, uma área de  $1 \text{ km}^2$  permite instalar  $40 \text{ MW}$  deste conversor de energia. No entanto, cada dispositivo apresenta apenas um reduzido output energético o que aumenta os custos e reduz a viabilidade económica. Pela mesma razão, o DMP é atualmente classificado como sistema apropriado principalmente para zonas remotas, situações de emergência e aplicações clandestinas, onde a procura de eletricidade não é tão elevada <sup>[26] [27]</sup>.

Ao longo das últimas duas décadas foram desenvolvidas várias tecnologias para usufruir da energia contida nas ondas oceânicas, de maneiras muito variadas.

Por um lado, existe a possibilidade de aproveitar a variação da pressão num ponto, causada pelo peso de uma onda em passagem (AWS, *Bombora mWave* e DMP). Em águas de pouca profundidade, é possível aproveitar o movimento predominantemente horizontal das partículas de água, através de palas móveis (como é o caso do *Waveroller*) ou a partir de boias submersas, acionadas pela energia cinética das ondas (*CETO*). Já no caso do *Wavestar*, do *Pelamis* ou dos sistemas OWC, a própria ondulação da superfície é responsável por acionar mecanismos que permitem a geração de energia elétrica.

De uma maneira geral, conclui-se que os sistemas submersos deverão ter uma longevidade superior face a mecanismos que operam à superfície. O mesmo recurso que se torna tão atrativo para o aproveitamento da sua energia, constitui também o maior obstáculo ao sucesso das tecnologias. A manutenção dos sistemas ancorados ao fundo marinho, deverá constituir o maior problema, no caso de não existir a possibilidade de controlar remotamente a emersão das mesmas.

Naturalmente, para o mesmo tipo de tecnologia, sistemas maiores representam uma potência instalada superior, mas também despesas mais acentuadas na construção e manutenção. Se o mecanismo de conversão de energia das ondas se provar suficientemente eficiente, então o investimento constitui um risco que vale a pena ser tomado.

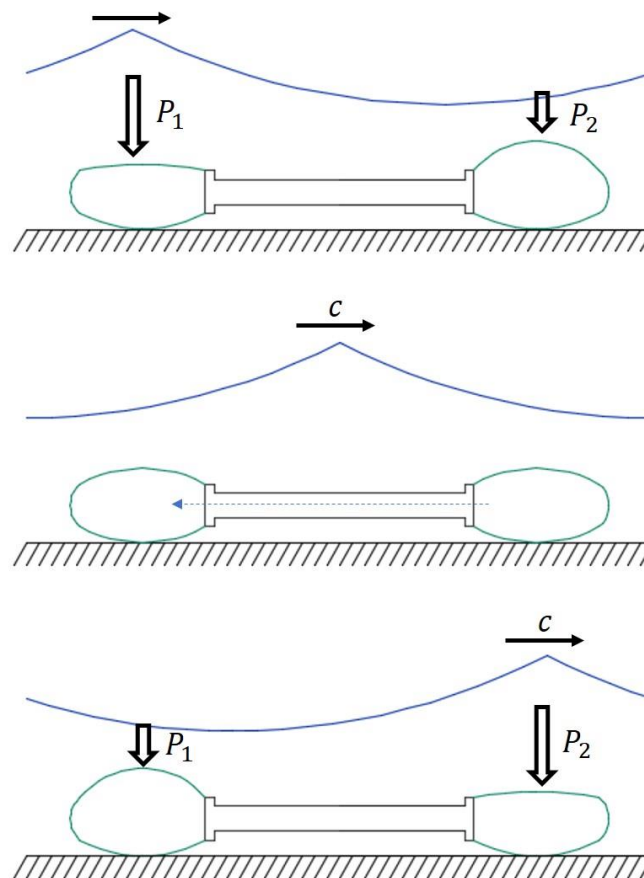
## Capítulo 3 Sistema de reservatórios compressíveis

O presente capítulo apresenta a abordagem prática de um conceito que serviu de base para um entendimento geral das ondas e a familiarização com maneiras de explorar este recurso. Assim, nesta fase inicial da dissertação, com base numa ideia proposta, pretendeu-se apenas construir um modelo simples, focando maioritariamente no material usado e o equipamento aplicado nos ensaios práticos.

### 3.1 Noções iniciais

O fundamento e ponto de partida desta dissertação consistiu numa ideia inicial muito simples: se se anexarem dois sacos às extremidades de um tubo, será possível provocar um fluxo de ar dentro deste sistema? Intuitivamente percebemos que, se dito sistema for estanque e as junções saco-tubo forem suficientemente fortes, somos capazes de causar manualmente um fluxo de sentido variável, comprimindo alternadamente os dois sacos. O movimento do fluido traduz-se no transporte de energia cinética, a qual pode ser aproveitada por meio de uma turbina colocada dentro do tubo, no centro deste sistema.

E no mar, será que a situação é tão simples? Para criar o caudal descrito ter-se-ia que aplicar uma força vertical com sentido descendente, por exemplo, a partir do peso de uma onda. Ou seja, o sistema encontrar-se-ia submerso, possivelmente encostado ao fundo marinho, e perpendicular à costa. Quando uma onda passasse por cima da estrutura, o aumento da coluna de água levaria a uma pressão maior sobre o primeiro saco ( $P_1$ ) e depois no segundo ( $P_2$ ), fazendo deslocar um fluido de trabalho entre os dois reservatórios (Figura 3.1).



**Figura 3.1** Esquemática da ideia inicial

Com o objetivo de testar experimentalmente a ideia dos dois reservatórios deformáveis pretendeu-se construir um pequeno dispositivo com o menor custo possível.

Assim, dentro do panorama daquilo que é técnica e economicamente viável, resumiram-se em primeiro lugar as características que se propôs implementar e explorar neste modelo:

- ✓ Sistema que opere em águas pouco profundas;
- ✓ Procurar beneficiar da variação de pressão num determinado ponto devido ao peso das ondas;
- ✓ Explorar alternativas para o fluído de trabalho dentro do sistema, nomeadamente, ar ou água;
- ✓ Escolha adequada dos reservatórios quanto à dimensão e material aplicado;
- ✓ Dimensionamento apropriado da conduta entre os reservatórios, no que diz respeito ao material constituinte, ao comprimento, ao diâmetro e à espessura da parede do tubo.

Numa fase anterior à construção propriamente dita e previsão de resultados, apontaram-se uma série de potenciais dificuldades:

**Velocidade das ondas:** as ondas deslocam-se a uma certa velocidade que se torna mais reduzida perto da costa. Mesmo para ondas com alturas pequenas, cuja rebentação é mais retardada do que a de ondas maiores, digamos, uma onda com 1 metro de altura (amplitude  $A = 0,5\text{ m}$ ) numa profundidade reduzida de apenas 2 metros, esta ainda se movimenta a uma velocidade  $c = 4,4\text{ m/s}$ . Consequentemente, a força seria aplicada durante muito pouco tempo em cada um dos reservatórios.

**Impulsão do sistema:** se o fluido de trabalho for ar, é natural que haja uma força resultante de sentido ascendente devido à diferença entre as densidades do ar e da água – a força de impulsão é mais acentuada quanto maior for o volume dos reservatórios. Ter-se-ia que introduzir lastro ao sistema ou substituir o ar por outra substância tão ou mais densa que a água envolvente.

**Comprimento de onda variável:** supondo que existem soluções práticas para os problemas anteriores e que a velocidade das ondas e a impulsão não constituem um problema. A finalidade do sistema é aproveitar a variação da pressão por cima dos dois sacos. Isto significa que, no caso ideal, a crista da onda (que exerce pressão máxima) se encontra por cima do primeiro saco quando o vale (que exerce a pressão mínima) se encontra por cima do segundo saco. Ou seja, a eficiência da estrutura estaria dependente da relação entre o próprio comprimento e o comprimento das ondas que, na verdade, é muito variável. Poderão haver ondas sucessivas com  $\lambda$  de tal forma pequeno que caberiam vários comprimentos de onda por cima do sistema; por outro lado, a onda pode ser tão comprida que abrange muito mais do que o comprimento de toda a estrutura – este caso é mais provável.

Exemplificando: considerando uma onda com um período típico de 10 s (ex.: Peniche). Segundo as equações de ondas lineares em águas pouco profundas, numa profundidade de 2 m esta onda continua a ter cerca de 44 metros de comprimento, o que devolve uma noção das dimensões que esta estrutura teria que ter para aproveitar, eficientemente, ondas maiores.

**Turbulência:** uma parte da ideia inicial consistia, precisamente, na simplicidade do sistema a vários níveis – não apenas a estrutura modesta em termos de material e dimensões, que não implicaria custos demasiado acentuados, mas também o facto de ser implementado perto da costa, onde poderia ser testado, monitorizado e acedido *mais facilmente*. Porém, viu-se no Capítulo 1 que, à medida que a onda se deslocava em águas cada vez mais rasas, a energia seria transportada mais à superfície; as partículas de água descreviam trajetórias elípticas, predominando a velocidade horizontal. Nestas condições, o recurso que se pretende aproveitar torna-se um grande obstáculo para uma estrutura tão sensível.

Após estas primeiras observações, conclui-se que existe muito a acrescentar e melhorar na ideia base, para que o modelo, a desenvolver num ramo prático, aproveite mais eficientemente a energia disponível, sem ser um alvo fácil para a força devastadora das ondas.



## 3.2 Componentes básicas da estrutura

O sistema consistiu em dois reservatórios, uma conduta para o fluido, uma sonda medidora de velocidade e peças de interligação. As características dimensionais de todos os elementos constituintes serão abrangidas nesta secção.

### 3.2.1 Reservatórios

A aplicação de sacos de plástico como reservatórios pareceu pouco fiável devido à parede demasiado fina. Assim sendo, optou-se por dois colchões insufláveis como o indicado na Figura 3.2, com  $720\text{ mm}$  de largura e  $1760\text{ mm}$  de comprimento, cada um perfazendo uma capacidade de cerca de 200 litros. A rosca para o enchimento tinha apenas  $21\text{ mm}$  de diâmetro. Esta característica poderia causar constrangimento à passagem do fluido, diminuindo consideravelmente a velocidade obtida dentro do tubo. Mais à frente voltar-se-á a abordar este problema.



**Figura 3.2** Colchão insuflável aplicado no sistema

### 3.2.2 Sonda

De forma a medir a velocidade do fluido entre os dois colchões, a parte central do sistema consistiu numa sonda *PASCO: flow rate/temperature sensor* (Figura 3.3). Este equipamento é normalmente usado para a medição de caudais em rios. A pequena turbina hidráulica *Octura 1255* (componente amarela) com  $55\text{ mm}$  de diâmetro encontra-se dentro de um tubo branco com diâmetro interno de  $59\text{ mm}$ , diâmetro externo de  $63,5\text{ mm}$  e comprimento  $82\text{ mm}$ . A turbina submersível contém uma peça de plástico com dois ímanes. Através da passagem do fluido dá-se a rotação da turbina e dos ímanes. Assim, a contagem das respetivas revoluções é convertida em medidas de velocidade de escoamento, em  $m/s$ .



**Figura 3.3** Turbina da sonda PASCO

Uma vara extensível ligada à turbina, permite a transferência de dados de medição a partir de um cabo que irá ligar a uma interface, como se virá mais adiante. Note-se que a turbina do sensor é de sentido único pelo que só serão relevantes os dados que dizem respeito ao movimento do fluido quando é aplicada força no primeiro colchão.

### 3.2.3 Conduto

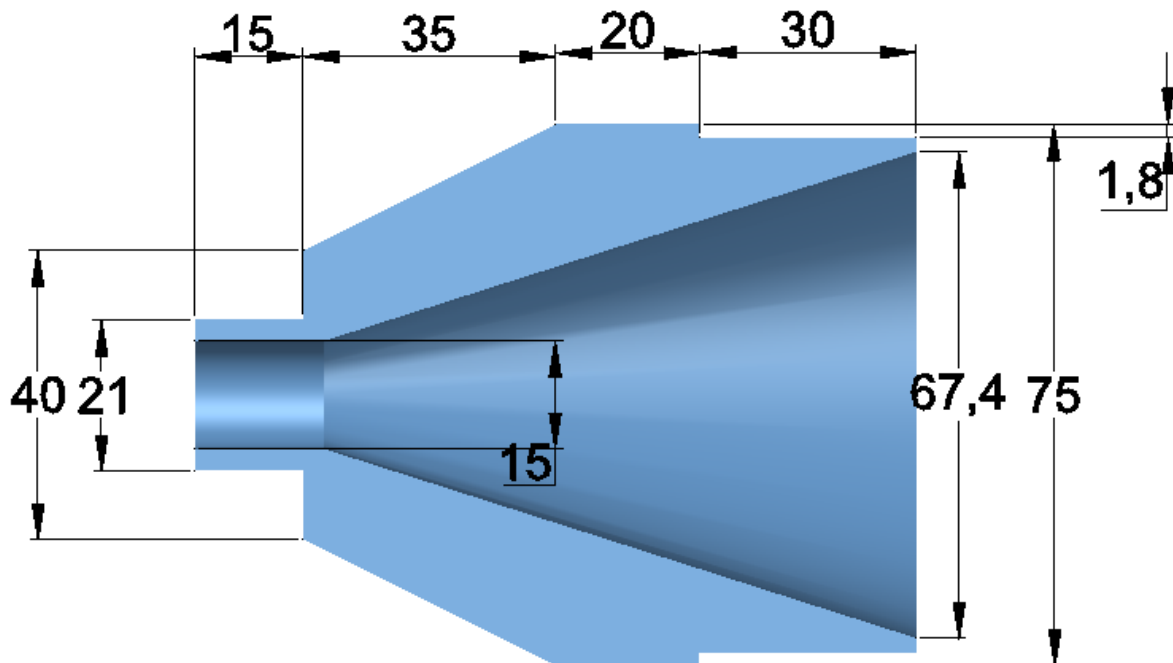
A conduta foi construída com dois tubos ligados a cada um dos lados da sonda e ao respetivo colchão. A escolha incidiu em tubos de Policloreto de vinil (PVC) com 1 metro de comprimento, 75 mm de diâmetro externo e 71,4 mm de diâmetro interno. O PVC é um plástico resistente usado frequentemente para condutas de água em aplicações municipais e industriais. Com base na sua resistência mecânica optou-se por tubos com apenas 1,8 mm de espessura, economizando em despesas neste elemento.

## 3.3 Procedimento com orifícios originais

Numa primeira fase experimental aproveitou-se o enrocamento estreito já existente para o enchimento de um colchão, de modo a não danificar os reservatórios. Para isso foi necessário desenvolver peças que estabelecessem os acoplamentos colchão-tubo e tubo-sonda.

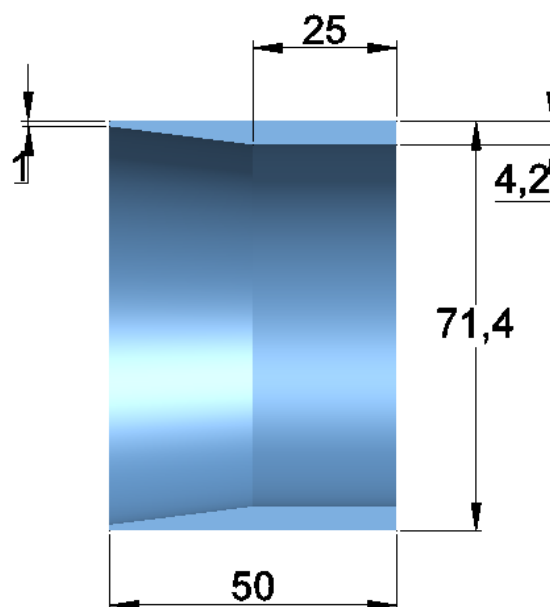
### 3.3.1 Construção e implementação dos acoplamentos

Ambas as peças foram dimensionadas computacionalmente e desenvolvidas num torno com o material Polioximetileno (POM), um termoplástico rijo e resistente. A peça para a junção colchão-tubo (Figura 3.4) foi de enrocamento do lado do colchão (lado esquerdo da figura) e de encaixe através de pressão do lado do tubo (lado direito da figura).



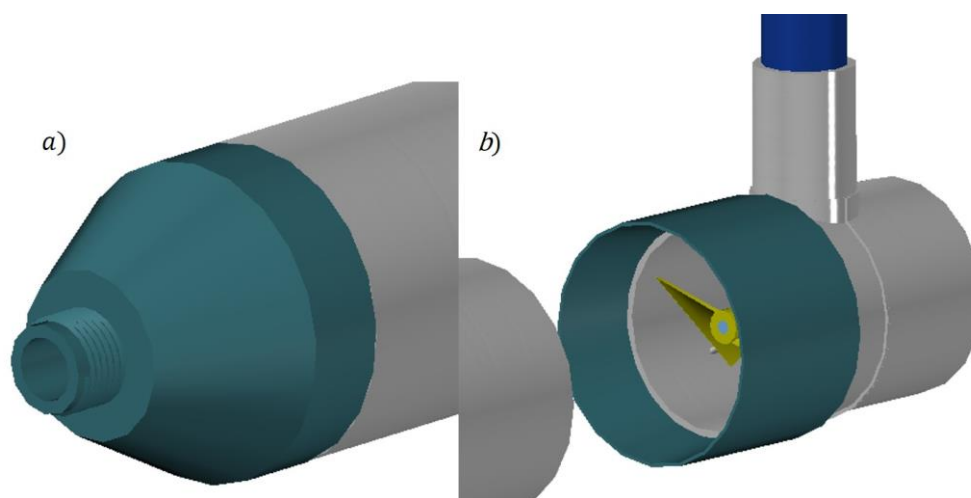
**Figura 3.4** Secção lateral da peça de acoplamento entre o colchão e o tubo de PVC (medidas em mm)

Por sua vez, o acoplamento tubo-sonda foi de encaixe através de pressão, dos dois lados. Na Figura 3.5, o lado esquerdo corresponde à conexão com o tubo e o lado direito à junção com a sonda medidora.



**Figura 3.5** Secção lateral da peça de acoplamento entre o tubo e a sonda (medidas em mm)

Com as peças construídas passou-se à montagem do sistema. As respetivas ligações através dos acoplamentos, encontram-se representadas na Figura 3.6.



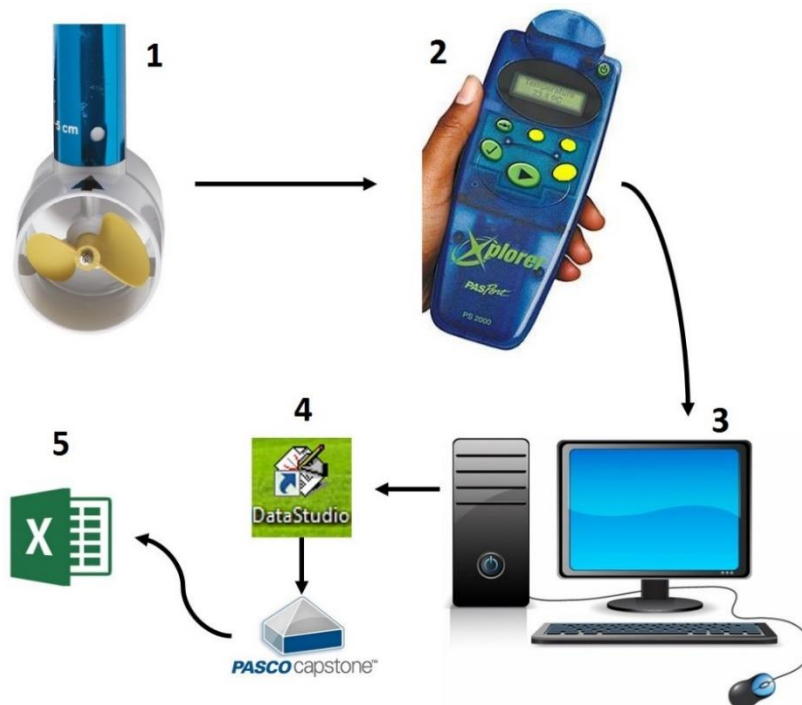
**Figura 3.6** a) Ligação entre a peça de acoplamento e o tubo b) Ligação entre a peça de acoplamento e a sonda

### 3.3.2 Equipamento *PASCO scientific*

Antes de se ter avançado com a atividade experimental propriamente dita, foi necessário entender o funcionamento do equipamento para a recolha de dados. Este consistiu na sonda referida anteriormente, uma interface para os dados medidos (*PASPORT Xplorer PS2000*) e o software *DataStudio* versão 1.6.

A interface, quando ligada através de um cabo a um dispositivo medidor, permite a gravação instantânea das medições adquiridas no próprio local da experiência. Posteriormente, com o software instalado num computador, é possível transferir e visualizar os dados a partir de um cabo *PS-2500 USB extension cable*. Uma vez que todo este equipamento foi desenvolvido no início dos anos 2000 foi necessário instalar um segundo software mais recente (*PASCO Capstone*), simultaneamente compatível com os sistemas operativos atuais e o software *DataStudio*.

Todo o processo de recolha de dados, durante um ensaio experimental, pode ser traduzido pelo esquema da Figura 3.7: 1) Medição do fluxo produzido dentro do sistema; 2) Gravação dos dados na interface; 3) Ligação entre a interface e o computador; 4) Reconhecimento dos dados por parte do *DataStudio* e transferência dos mesmos para o programa mais recente *Capstone*; 5) Cópia e análise computacional dos resultados em Excel.



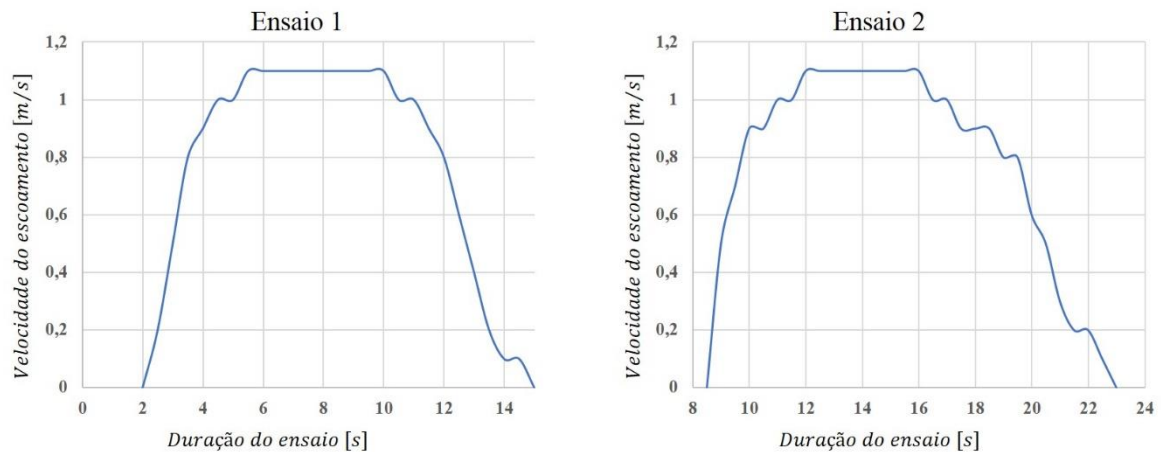
**Figura 3.7** Esquema do processo de recolha de dados durante uma atividade experimental

### 3.3.3 Ensaio inicial

Com o intuito de verificar, de forma breve, a viabilidade prática do procedimento demonstrado, recorreu-se a um primeiro ensaio *a seco*. Para tal, montou-se o sistema pela ordem colchão – tubo – sonda – tubo, excluindo o segundo colchão. Ligou-se a interface *Pasport Xplorer* ao instrumento de medição e o computador à interface; com uma bomba de ar encheu-se completamente o sistema tapando a saída do segundo tubo de PVC (ou seja, a peça de acoplamento da Figura 3.6) com a tampa de enroscamento original do colchão.

De maneira a aplicar uma força homogeneamente distribuída, colocou-se uma mesa com  $1200 \times 600 \text{ mm}$  e massa  $20,5 \text{ kg}$  sobre o colchão, com o tampo virado para baixo. Iniciando a medição e registo de dados na interface, desenroscou-se a tampa e registou-se a variação da velocidade de escoamento na secção da sonda.

Este procedimento foi efetuado duas vezes verificando-se, em ambos os ensaios (Figura 3.8), que a velocidade máxima foi de apenas  $1,1 \text{ m/s}$  atingida ao longo de  $4 \text{ s}$  consecutivos. Estes resultados apoiaram a decisão à implementação de orifícios com maior diâmetro para reduzir a perda de carga e aumentar a velocidade do fluxo no sistema.



**Figura 3.8** Ensaios a seco com os orifícios originais dos colchões

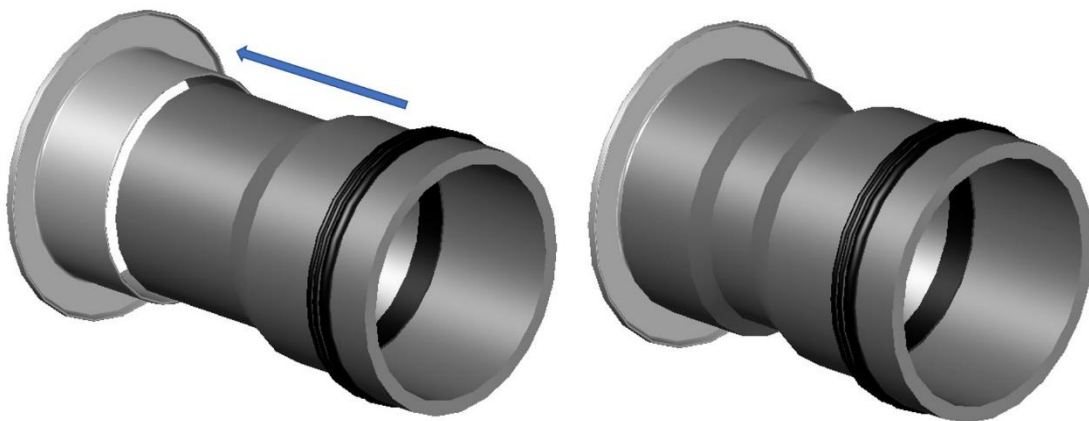
### 3.4 Procedimento com orifícios expandidos

#### 3.4.1 Construção da estrutura e implementação dos orifícios expandidos

Através dos primeiros ensaios com os orifícios originais evidenciou-se a necessidade de redimensionar a saída de ar dos dois colchões, uma alteração que implicou a danificação dos reservatórios pondo em causa a estanqueidade do sistema.

De maneira a maximizar o fluxo de ar e diminuir as perdas de carga à saída e entrada do primeiro e segundo colchão, respetivamente, as aberturas nestes dois reservatórios deveriam ter um diâmetro semelhante aos tubos dentro dos quais o fluido de trabalho circula.

Continuou-se a usar as peças de acoplamento entre os tubos e a sonda pois estas desempenhavam a sua função com sucesso. Para os novos orifícios aproveitaram-se aros de metal, com diâmetro interno de 74 mm, que permitiam uma superfície de colagem. De seguida, utilizaram-se dois abocamentos de PVC possibilitando a junção com os tubos dos ensaios anteriores. Aquecendo as extremidades destes abocamentos o material tornou-se flexível levando à sua expansão e encaixe nos aros de metal, tal como indicado na Figura 3.9.



**Figura 3.9** Ligação entre o abocamento (cinzento escuro) e o aro de metal (cinzento claro)

Posteriormente removeu-se o orifício com rosca de cada um dos colchões, recortando uma abertura com 74 mm de diâmetro. Desta forma, a componente da Figura 3.9 foi unida ao colchão a partir de resina epóxi de duas componentes ao qual se seguiu um período de secagem e endurecimento de 24 horas.

Finalmente, colou-se uma faixa de plástico moldável por cima da parte exposta do aro de metal de forma a reforçar a união entre este e o colchão, seguindo-se novamente um período de cura das junções (Figura 3.10, à direita).

Com o intuito de facilitar o abastecimento do sistema com ar criou-se um furo na parte central superior de um dos tubos. A esta perfuração uniui-se um conector comum de mangueiras ao qual foi ligada a bomba de ar (Figura 3.10 à esquerda). Os tubos foram encaixados nos abocamentos e apertados com abraçadeiras inox.

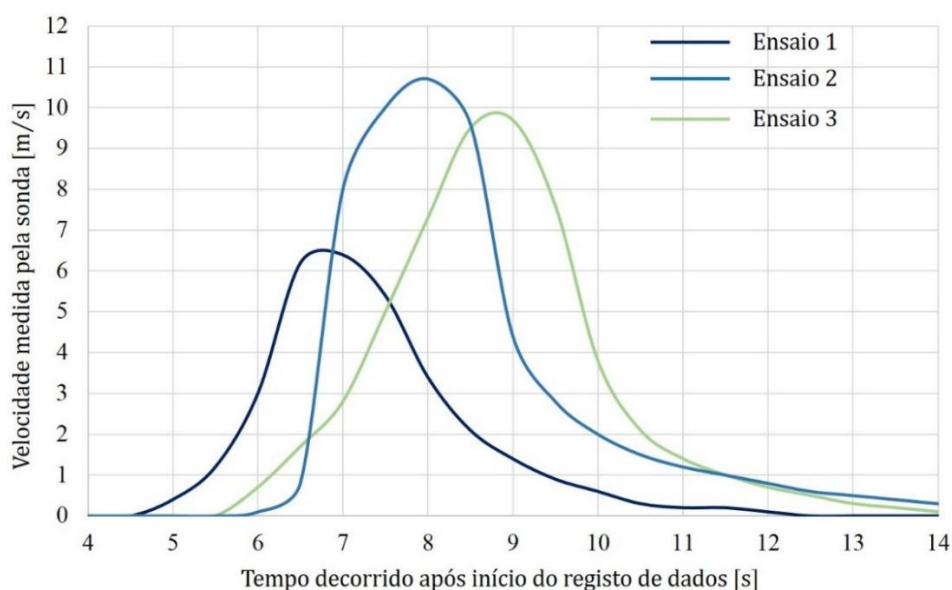


**Figura 3.10** Esquerda: Conexão do sistema com a conduta da bomba de ar; Direita: Nova junção entre o tubo e o colchão

### 3.4.2 Ensaios *a seco*

Para os ensaios em laboratório ligaram-se todas as componentes pela ordem colchão-tubo-sonda-tubo-colchão. O sistema foi enchido com ar até se atingir aproximadamente 75 % da capacidade máxima. Após serem identificadas e remediadas as fissuras restantes tomou-se o sistema como estanque procedendo-se com os testes práticos.

Iniciou-se o registo de dados colocando, seguidamente, a mesa por cima do primeiro colchão, tal como nos ensaios anteriores. Efetuaram-se 3 ensaios cujos resultados se encontram representados na Figura 3.11.



**Figura 3.11** Resultados dos ensaios *a seco* para o sistema com orifícios expandidos



Verificou-se um aumento acentuado na velocidade de escoamento do ar face à estrutura anterior. No ensaio 1 registou-se um valor máximo de  $6,4 \text{ m/s}$ , enquanto que nos ensaios 2 e 3 foram apontados picos de  $10,7$  e  $9,7 \text{ m/s}$ , respetivamente. A discrepância entre os resultados pode ser a consequência de condições de teste distintas, como o modo de colocação diferente da mesa por cima do colchão ou diferentes quantidades iniciais de ar contidas no sistema em cada ensaio. Para qualquer um dos casos a força aplicada pela mesa foi exercida entre 2 a 3 segundos até o segundo colchão atingir a sua capacidade máxima. A partir desse momento a turbina continuou a rodar, sem a existência de fluxo de ar entre os colchões até a sonda medir valores nulos. Assim, os resultados que dizem respeito à deslocação do ar são os anteriores ao decréscimo da velocidade medida em cada ensaio.

Posteriormente, devido à densidade energética inferior do ar considerou-se encher o sistema com água. Porém, a aplicação deste fluido de trabalho só faria sentido se todo o sistema fosse colocado dentro de água. Caso contrário, o peso elevado da massa de água contida nos colchões tornaria a sua deslocação difícil. Por esta razão pretendeu-se testar o sistema com água apenas na situação real.

### 3.4.3 Ensaio na praia

As componentes individuais do sistema foram transportadas para a praia da Almagreira a Norte de Peniche. O sistema foi montado em terra e as junções entre as partes integrantes foram condicionadas para a maior estanqueidade possível. O intuito da experiência na praia foi colocar o sistema dentro de água, fixo ao fundo através de pesos e cordas e enchê-lo parcialmente com água, de modo a aplicar força num dos colchões e observar os valores de velocidade medidos pela sonda.

Escolheu-se um dia com ondulação abaixo da média, entre  $1$  e  $1,5 \text{ m}$ . O sistema devia ser enchido pelo orifício inicialmente designado ao abastecimento com ar. A estrutura foi ancorada a uma profundidade de cerca de  $0,5 \text{ m}$ , perpendicular à costa e fora da zona de rebentação. A água foi entrando em pequenas quantidades dentro dos colchões provando-se, no entanto, insuficiente para ser deslocada entre os dois reservatórios. Após 30 minutos dentro de água as junções entre os aros de metal e os colchões cederam impondo um final ao ensaio prático.

A elaboração de ensaios práticos na praia provou-se inconclusiva quanto a resultados numéricos. Tal como suspeitado, os orifícios de maior dimensão levaram a uma fragilidade superior e estanqueidade reduzida do sistema, após a remoção dos orifícios originais dos colchões. O facto de os reservatórios terem sido enchidos fora da zona de rebentação, expôs todo o sistema às forças predominantemente horizontais da água, empurrando os colchões para trás e para diante e forçando ainda mais as ligações entre as diversas componentes. Outro fator contraprodutivo acabou por ser a ação da maré e o aumento do nível da água criando turbulência acrescentada ao longo do tempo e obrigando ao reposicionamento gradual do conjunto sistema/lastro.

### 3.4.4 Potenciais melhorias

Após a realização dos ensaios em laboratório e na praia resumiram-se as características benéficas e os pontos a melhorar relativamente aos testes realizados e a estrutura construída.

Não obstante o facto de não se terem obtido resultados experimentais com água a circular no sistema, a aplicação do ar pareceu uma solução mais adequada pois os reservatórios seriam facilmente compressíveis permitindo uma resposta rápida de cada reservatório face à pressão exercida por uma onda. Esta premissa é corroborada pelos ensaios a seco, tendo-se observado que o peso de uma mesa levava um colchão a esvaziar rapidamente. Naturalmente, dentro de água, todo o sistema terá que estar sujeito a lastro de modo a compensar a impulsão elevada que resulta da densidade muito inferior do ar.

Supondo que a estrutura é construída de tal forma que as junções entre as diversas componentes resistem à ação da água do mar. De maneira a evitar a exposição às condições turbulentas entre a zona de rebentação e a costa, todo o mecanismo em conjunto com o lastro deve ser transportado à superfície da

água e seguidamente inserido na zona de implementação escolhida. A Figura 1.2 (pág. 6) sugere que para maiores profundidades é possível aproveitar ondas de maior amplitude. Mesmo para um modelo de pequenas dimensões, como o que foi elaborado neste capítulo, deve ser considerada uma profundidade de pelo menos 5 metros de modo a que o sistema interage com ondas bem definidas. O declive da zona de implementação do sistema também deverá ser pouco significativo pois um declive mais acentuado traduz-se numa variação de profundidade maior que, por sua vez, tem impacto substancial na altura da onda e a sua dissipação energética.

Segundo as equações de ondas lineares uma onda com período típico de 10 s a deslocar-se em águas com profundidade de 5 m, apresenta um comprimento de 70 m. De maneira a maximizar a diferença de pressão sobre os dois reservatórios o comprimento total do sistema terá que ser aproximadamente igual a metade do comprimento de onda, como se observou anteriormente. Assim sugere-se tubos mais extensos, porém, colchões menores em comprimento e maiores em largura.

### 3.5 Analogia com o Delos-Reyes Morrow Pressure Device

Numa fase avançada da análise deste conceito, já após as tentativas de teste em situação real, verificou-se a existência do Delos-Reyes Morrow Pressure Device, ou DMP (ver pp. 19-20). Conceptualmente o modelo aparentou ser igual ao trabalho desenvolvido e sugere um encapsulamento em aço dentro do qual se encontram os reservatórios compressíveis. Desta forma, o fluido de trabalho pode ser ar, sendo a impulsão compensada pelo peso elevado da estrutura envolvente.

O conceito, apesar de ter surgido no início da década de 90, ficou arquivado durante vários anos sem qualquer progresso tecnológico. Apenas em 2008 ressurgiu, dando-se início a ensaios práticos em tanques de ondas e o desenvolvimento do modelo até ao nível de maturidade tecnológica TRL4. O facto de haver investimento persistente nesta tecnologia realça o potencial do conceito investigado neste capítulo. Não obstante, deve ser sublinhado que a ideia já tem mais de duas décadas de existência sem ter conseguido desenvolver-se tão rapidamente como outros conversores da energia das ondas. De facto, a empresa M3Wave, dedicada ao desenvolvimento do DMP, participou no Wave Energy Prize entre 2015 e 2016, atingindo a etapa final do concurso, porém, terminando em 8º lugar <sup>[28]</sup>. Isto pode sugerir a existência de várias maneiras mais preferenciais de explorar a energia das ondas.

Terminando o capítulo, pretendeu-se partir para um conceito original, com base nos conhecimentos obtidos através da revisão do estado da arte, da cinemática das ondas e do modelo dos reservatórios compressíveis. O novo modelo, apresentado no capítulo seguinte, deve incluir características vantajosas como a proximidade à costa, operação no fundo marinho e aproveitamento do peso das ondas. Por outro lado, não deve ter a mesma dependência do comprimento de onda como o conceito explorado pelo DMP.



## Capítulo 4      Conceito alternativo: Wave piston

No seguimento da elaboração de um modelo num panorama prático e com a obtenção de conhecimentos mais aprofundados acerca da cinemática das ondas, modelou-se um segundo sistema de aproveitamento energético. No Capítulo 3, pretendeu-se demonstrar o funcionamento de um mecanismo e abordá-lo num ramo exclusivamente experimental, construindo uma estrutura simples.

A linha de raciocínio inicial para o segundo modelo baseou-se no simples método da tentativa-e-erro: partindo de um conjunto de ideias básicas e pressupostos desenvolveu-se o sistema em Matlab e AutoCAD, corrigindo gradualmente os aspetos negativos e falhas de lógica, acrescentado variáveis em falta, de modo a chegar a uma solução final com viabilidade técnica.

O conceito foi abordado exclusivamente de um ponto de vista teórico, analisando o seu funcionamento, o material das suas componentes, estimativas de *output* energético e eficiência global do processo de conversão.

### 4.1 Conceito

O novo modelo encontra-se completamente submerso e consiste num cilindro que contém um êmbolo. Este deve ser acionado, num movimento ascendente e descendente, através da variação da pressão por cima de um flutuador\* com o qual se encontra unido. Quando a onda passa do seu ponto mais baixo para o mais alto, ou seja, do vale para a crista a coluna de água e a pressão por cima do flutuador aumentam: o êmbolo é empurrado para baixo (Figura 4.1 à esquerda). Por cima da base do cilindro, na parede do mesmo, existe um orifício com uma conduta que conecta o interior do sistema com a superfície da água. No início desta conduta encontra-se a turbina e o gerador elétrico. A outra extremidade da conduta é mantida por cima da superfície da água através de boias. Quando a onda passa do ponto mais alto para o mais baixo, isto é, da crista para o vale da onda, a coluna de água por cima do flutuador diminui, exercendo menos pressão e provocando a subida do êmbolo: o diferencial negativo de pressão, criado imediatamente por baixo do êmbolo, *puxa* o ar para dentro do cilindro acionando novamente a turbina (Figura 4.1 à direita).

Verificam-se, à partida, características semelhantes com outros modelos: o aproveitamento da energia potencial gravítica da altura das ondas (ver *Archimedes Wave Swing*, pág. 14) e o uso do fluxo de ar com sentido variável para impulsionar uma turbina bidirecional, típico de um sistema de coluna de água oscilante (ver pág. 11).

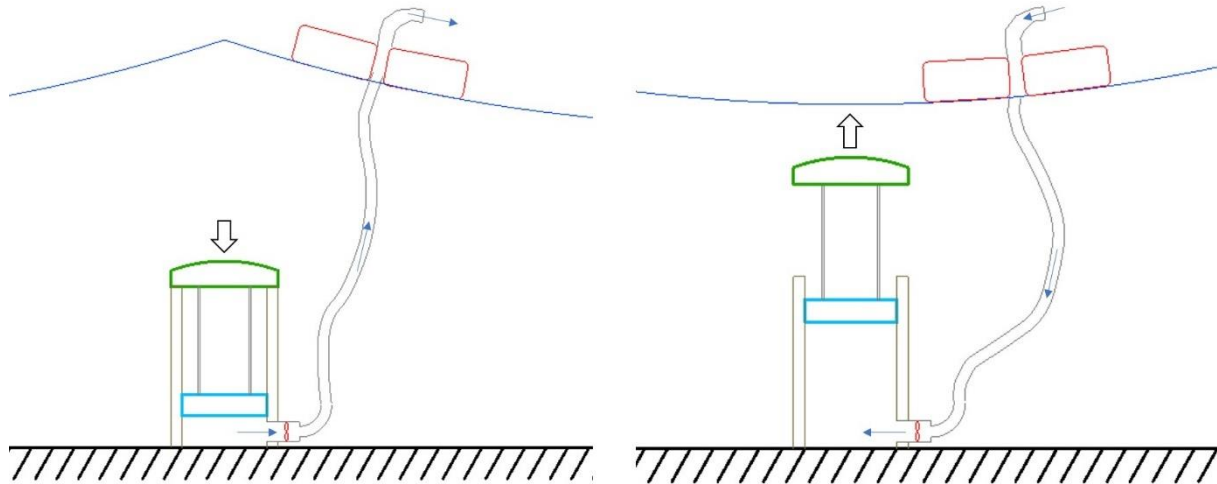
Os benefícios que se apontam em primeira análise para o novo modelo são:

- Reduzido impacto visual: o sistema electroprodutor encontra-se completamente submerso, para além das boias e da estrutura de troca de ar, que poderão servir como sinalizador da posição do modelo. Em contraste, o sistema OWC típico encontra-se todo à superfície, seja ele *onshore* ou *offshore*;
- Deve operar perto da costa, o que reduz o comprimento dos cabos elétricos submarinos e facilita possíveis manutenções;
- Não depende do comprimento nem da direção das ondas;
- Funciona com uma vasta gama de amplitudes de onda e, dependendo do dimensionamento do êmbolo/flutuador, poderá produzir energia inclusivamente para ondas de altura muito reduzida.

---

\* O termo flutuador refere-se, neste caso, a uma componente que se encontra totalmente submersa em qualquer instante, nunca devendo estar à superfície, como se verá na secção 4.2.4.

- As componentes mecânico-elétricas não se encontram em contacto com a água do mar, podendo aumentar a longevidade do mecanismo.



**Figura 4.1** Esquema do funcionamento do conceito

## 4.2 Dimensionamento

Prevê-se um conjunto de componentes básicas para o funcionamento do modelo. Algumas destas componentes poderão ser dimensionadas de acordo com fundamentos numéricos, no entanto, outras terão que ser impostas por hipótese para mais tarde serem redimensionadas de acordo com as características mais benéficas que tornarão o modelo o mais eficiente possível. A conduta para a troca de ar será excluída do dimensionamento, um aspeto justificado posteriormente. Assim, os elementos dimensionados nesta secção serão a câmara-de-ar, o êmbolo, o flutuador, a turbina e o gerador elétrico.

### 4.2.1 Câmara-de-ar

A câmara-de-ar é a estrutura em betão que irá conter o cilindro dentro do qual se desloca o êmbolo. Esta componente deve resistir às pressões elevadas da profundidade na zona de implementação. Ao mesmo tempo deve apresentar peso suficiente para compensar a impulsão que atua no flutuador. O seu dimensionamento propriamente dito depende das restantes componentes, nomeadamente do volume do flutuador, e será apresentado mais adiante.

### 4.2.2 Êmbolo

O êmbolo desloca-se dentro do cilindro da câmara-de-ar empurrando ar para fora do cilindro ou puxando ar atmosférico para dentro do sistema. De modo a garantir uma fricção atenuada durante o movimento de operação do mecanismo sugeriu-se, inicialmente, um revestimento em Politetrafluoretileno (PTFE) -*Teflon* - em cada uma das duas superfícies (isto é, uma camada de 1 mm em cada um dos anéis do êmbolo e no cilindro interno da câmara de ar). O contacto *teflon-teflon* apresenta um dos coeficientes de atrito estático/cinético mais reduzido nos materiais sólidos ( $\mu_e = \mu_c = 0,04$ ) [29]. No entanto, exhibe também elevado desgaste quando exposto a fricções de longa duração, um aspeto de importância imperativa quando um dos objetivos centrais consiste em obter uma estrutura que, para além de estanque, não tenha que ser sujeita frequentemente a manutenções, pois isso poria em causa a viabilidade económica do modelo.

O volume de desgaste de um material face a fricção ( $V_{desgaste}$ , geralmente indicado em  $mm^3$ ) pode ser calculado da seguinte forma <sup>[30]</sup>:

$$V_{desgaste} = K \frac{F_c L}{3B} \quad (4.1)$$

Na equação 4.1,  $F_c$  é a força normal ao movimento (ou força de contacto entre o êmbolo e o cilindro),  $L$  [m] corresponde à distância de deslizamento/fricção entre as duas superfícies em contacto,  $B$  [Pa] é a dureza de *Brinell* e  $K$  [adimensional] representa o coeficiente de desgaste, distinto para cada composto.

Por hipótese designar-se-á o sistema por estanque se a pressão de contacto entre o êmbolo e o cilindro for sempre superior à pressão exercida pela água imediatamente por cima do êmbolo. Esta última será máxima para a onda de maior amplitude no momento em que o êmbolo se encontra na sua posição mais baixa. No caso da zona de Peniche, o valor máximo registado para a amplitude é de  $A = 5,5$  m. Antecipando já uma parte do dimensionamento da câmara-de-ar, supõe-se que a distância entre o fundo oceânico e a superfície superior do êmbolo é 3,5 m. Sabendo que o modelo é colocado numa profundidade de 20 metros, a coluna de água por cima do êmbolo mede  $\Delta h = 20m + 5,5m - 3,5m = 22$  m. Recorrendo à equação de Bernoulli, calcula-se a pressão hidrostática máxima nesse ponto:

$$P_{max} = P_{atm} + \rho_{\text{água}} g \Delta h = 322\,541 \text{ Pa} \approx 323 \text{ kPa} \quad (4.2)$$

Este valor representa uma referência para a pressão de estanqueidade da câmara de ar. Ao atribuir uma pressão de contacto entre o êmbolo e o cilindro ter-se-á que garantir que nunca entre água no sistema, porém, note-se que, se se sobredimensionar a pressão de estanqueidade, aumenta-se a força de contacto e o atrito durante o deslocamento, reduzindo a mobilidade do êmbolo e a gama de velocidades que se poderão obter.

Supõe-se que o êmbolo foi construído em Nylon, um material rijo e leve com densidade típica de  $\rho_{Nylon} = 1150 \text{ kg/m}^3$ . A estrutura foi dimensionada de tal forma que a pressão entre o cilindro e a superfície lateral do êmbolo é 330 kPa. O êmbolo tem 4 anéis (ver Figura B.1): um anel superior com 5 mm de espessura denominado anel de vedação, dimensionado de tal forma que a pressão de contacto com o cilindro torna o sistema estanque. Por baixo deste, encontram-se três anéis estabilizadores com 5 cm de espessura cuja função é apenas encaixar o êmbolo dentro do cilindro, mas com uma pressão mais reduzida. Através do diâmetro externo dos anéis do êmbolo e a altura de cada anel determina-se a área da superfície de contacto e, seguidamente, a força normal/força de contacto entre o êmbolo e o cilindro interno da câmara de ar. A área do anel de vedação e a força de contacto entre este e o cilindro são, respetivamente, dados por:

$$A_{c,av} = 2\pi \times 1,2 \text{ [m]} \times 0,005 \text{ [m]} = 0,0377 \text{ m}^2 \quad (4.3)$$

$$F_{c,av} = 330 \text{ [kPa]} \times 0,0377 \text{ [m}^2] = 12,44 \text{ kN} \quad (4.4)$$

Dado que  $\mu_e = \mu_c = \mu$ , a força de atrito (estático e cinético) entre o anel de vedação e o cilindro fica:

$$F_{a,av} = \mu F_{c,av} = 0,50 \text{ [kN]} \quad (4.5)$$

O coeficiente de desgaste do *Teflon* é  $K_{PTFE} = 2,5 \times 10^{-5}$  e a sua dureza varia entre os 29,4 e 39,2 MPa <sup>[31]</sup>, consoante fatores como a temperatura do material, velocidade do deslize e pressão de contacto. Supondo que se verificam as condições mais benéficas para a conservação do PTFE, ou seja, valor mais elevado de  $B$ , e que, para cada onda que passa por cima do sistema, um ciclo (subida e descida do êmbolo) corresponde sempre ao deslocamento do êmbolo ao longo da maior amplitude (supondo, por agora, que  $L = 1,5 \times 2 \text{ m} = 3 \text{ m}$ ). Considerando uma força de contacto constante e desgaste uniforme ao longo do tempo, pela equação 4.1 vem:

$$V_{desgaste} = 2,5 \times 10^{-5} \times \frac{12,44 [kN] \times 3 [m]}{3 \times 39,2 [MPa]} = 7,93 \text{ mm}^3/\text{onda} \quad (4.6)$$

Em termos de variação de diâmetro do anel de vedação, o resultado anterior traduz-se em:

$$\Delta D_{av} = \frac{V_{desgaste}}{A_{c,av}} = 0,21 \text{ }\mu\text{m}/\text{onda} \quad (4.7)$$

Supondo que cada onda se desloca com um período típico de 10 s, nesse intervalo de tempo verifica-se o resultado de 4.7. Ou seja, após 80 minutos de operação o desgaste terá totalizado cerca de 1 mm, equivalente à espessura de uma camada de PTFE, pondo em risco a estanqueidade do sistema. Naturalmente não será viável proceder com manutenções em intervalos de tempo tão curtos, sendo necessário aplicar uma solução alternativa.

O estudo redigido por Burris *et al.* (2006) aborda esta temática <sup>[32]</sup>. Em análises experimentais combinaram-se os polímeros PTFE e PEEK (Polieter éter cetona) através da compactação destas duas substâncias em pó sob altas pressões e temperaturas. Desta forma produziram-se várias amostras sólidas de PTFE com teor volumétrico de PEEK a variar entre 0 e 100 %. O procedimento experimental consistiu no deslizamento das várias amostras de 6,35 × 6,35 mm por cima de uma superfície seca de aço polido (40 mm<sup>2</sup>) à pressão de contacto de 6,25 MPa e velocidade média 50,8 mm/s. As distâncias de deslizamento variaram entre os 0,5 km no caso da amostra de PTFE puro, até 140 km para a amostra com teor 20%<sub>PEEK</sub>. Uma vez que a dureza e o coeficiente de desgaste deste novo composto não eram conhecidos, a dissipação por fricção encontra-se representada na forma de taxa de desgaste através da razão  $K/B$ , expressa em mm<sup>3</sup>/(N · m) \*. Ou seja, o volume de composto dissipado por unidade de força de contacto e por metro de deslize. O resultado experimental mínimo de 2,3 × 10<sup>-9</sup> mm<sup>3</sup>/(N · m) foi conseguido para o teor volumétrico 20%<sub>PEEK</sub>, um desgaste 260 mil vezes inferior ao obtido nos ensaios com a amostra de PTFE puro. Para o ensaio de fricção com a amostra de PTFE com teor 20%<sub>PEEK</sub> registou-se um coeficiente de atrito médio de  $\bar{\mu} = 0,115$ .

Analogamente, no caso de estudo presente, poder-se-á revestir o cilindro da câmara-de-ar com uma camada de aço inox polido (tipo AISI 316, mais apropriado para aplicações em mar) e a superfície dos anéis do êmbolo com 1 mm do composto PTFE com 20%<sub>PEEK</sub>. Supondo, por agora, que a força de contacto se mantém aproximadamente constante ao longo do tempo de operação do modelo e que o êmbolo sobe e desce ao longo de toda a amplitude de deslocamento, pela equação 4.1 vem:

$$V_{desgaste} = 2,3 \times 10^{-9} \left[ \frac{\text{mm}^3}{\text{N} \cdot \text{m}} \right] \times \frac{12,44 [kN] \times 3 [m]}{3} = 2,86 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{onda} \quad (4.8)$$

Para a fricção entre o composto PEEK/PTFE e o cilindro de aço, em termos de variação de diâmetro do êmbolo, o resultado de 4.8 traduz-se em:

$$\Delta D_{\text{emb}} = \frac{V_{desgaste}}{A_{c,av}} = 7,59 \times 10^{-7} \text{ }\mu\text{m}/\text{onda} \quad (4.9)$$

O desgaste face ao contacto *Teflon-Teflon* diminui em cerca de 277 mil vezes, bastando uma manutenção aos anéis do êmbolo por vários anos de operação. Quanto à força de atrito resultante do contacto entre a superfície do êmbolo e o cilindro, esta triplica em relação à fricção *Teflon* com *Teflon* devido ao aumento do coeficiente de atrito de 0,04 para 0,115.

---

\* No próprio documento esta razão é indicada pela letra K, o que no presente estudo diz estritamente respeito ao coeficiente de desgaste.

O gradeamento interno indicado na Figura B.1 deverá garantir uma maior estabilidade a esta componente.

A força de contacto dos anéis estabilizadores  $F_{c,ae}$  será determinada mais à frente pois depende de outros parâmetros, não havendo, no entanto, problemas de desgaste pois a força de contacto entre estes e o cilindro deverá ser muito inferior à força de contacto  $F_{c,av}$ .

#### 4.2.3 Turbina

Para aproveitar um fluxo de ar de sentido variável optou-se por implementar a turbina Wells, tipicamente aplicada em sistemas de coluna de água oscilante. A turbina Wells é uma turbina de ar de baixa pressão que apresenta pás com perfil aerodinâmico simétrico (ver Figura 2.2, pág. 12). Esta característica mantém a direção da força tangencial independente do sentido do ar incidente pelo que, roda sempre no mesmo sentido. Apresenta, no entanto, uma eficiência aerodinâmica reduzida. A queda de pressão através de uma turbina Wells de plano único é proporcional ao quadrado da velocidade de rotação da ponta das pás que, por sua vez, é proporcional à velocidade do fluxo de ar no segmento da turbina. Como se esperam velocidades elevadas dentro deste segmento e, analogamente, quedas de pressão elevadas através da turbina, optou-se pela turbina Wells biplanar. Desta forma, o fluxo de ar passará por dois planos de pás em vez de um, aproveitando-se mais energia pneumática.

A Tabela 4.1 apresenta as características técnicas da turbina Wells biplanar de acordo com os ensaios computacionais de Shaaban (2012) <sup>[33]</sup> e o seu equivalente redimensionado à escala para o protótipo conceptual do presente caso de estudo.

**Tabela 4.1** Características da turbina segundo o estudo experimental de S. Shaaban e características da turbina aplicadas ao protótipo.

	Relatório científico	Protótipo
<b>Perfil aerodinâmico</b>	NACA0015	
<b>Número de planos</b>	2	
<b>Hub-to-tip ratio (<math>h</math>)</b>	0,68	
<b>Solidez por plano (<math>\sigma</math>)</b>	0,32	
<b>Diâmetro exterior (<math>D_t</math>) [m]</b>	0,59	1
<b>Folga de ponta (<math>t_c</math>) [m]</b>	0,001	
<b>Diâmetro do eixo (<math>D_h</math>) [m]</b>	0,4	0,68
<b>Coefficiente de fluxo (<math>\phi</math>)</b>	0,08 a 0,22	0,2
<b>Eficiência aerodinâmica (<math>\eta</math>)</b>	0,5 a 0,62	0,58
<b>Coefficiente de torque (<math>C_T</math>)</b>	0,01 a 0,08	0,07
<b>Coefficiente de queda de pressão (<math>\Delta p_0^*</math>)</b>	0,1 a 0,4	0,4
<b>Corda média (<math>c</math>) [m]</b>	0,125	0,1763
<b>Gap-to-chord ratio (<math>G/c</math>)</b>	1,4	

Na tabela anterior, *hub-to-tip ratio* representa a razão entre o diâmetro do eixo e o diâmetro exterior da turbina ( $D_h/D_t$ ) (ver Apêndice B, Figura B.2); A folga de ponta é a distância entre a ponta das pás e a parede interior do segmento da turbina; *Gap-to-chord ratio* é a razão entre a corda do perfil aerodinâmico das pás e a distância entre os dois planos do rotor; O coeficiente de fluxo diz respeito à razão entre a velocidade do fluxo incidente nas pás ( $V_x$ ) e a velocidade de rotação da ponta das pás ( $U_t$ ). Supõe-se que o design escolhido para a turbina permite manter  $\phi$  constante. Optou-se pelo coeficiente de fluxo de 0,2: apesar de não apresentar a eficiência aerodinâmica mais elevada, isto é 0,62 no caso de

$\phi = 0,14$ , permite, no entanto, uma maior queda de pressão ( $\Delta p_0$ ) e um binário mecânico (T) mais acentuado. Pela mesma razão escolheu-se uma turbina com raio maior do que a dos ensaios numéricos pois de acordo com Shaaban (2012):

$$\Delta p_0 = \Delta p_0^* \rho \omega_t^2 R_t^2 \quad (4.10)$$

$$T = C_T \rho \omega_t^2 R_t^5 \quad (4.11)$$

Nas equações 4.10 e 4.11  $\omega_t$  é a velocidade angular da turbina ( $rad/s$ ),  $R_t$  é o raio da turbina ( $m$ ) e  $\rho$  a densidade do ar que circula no sistema ( $kg/m^3$ ).

#### 4.2.4 Flutuador

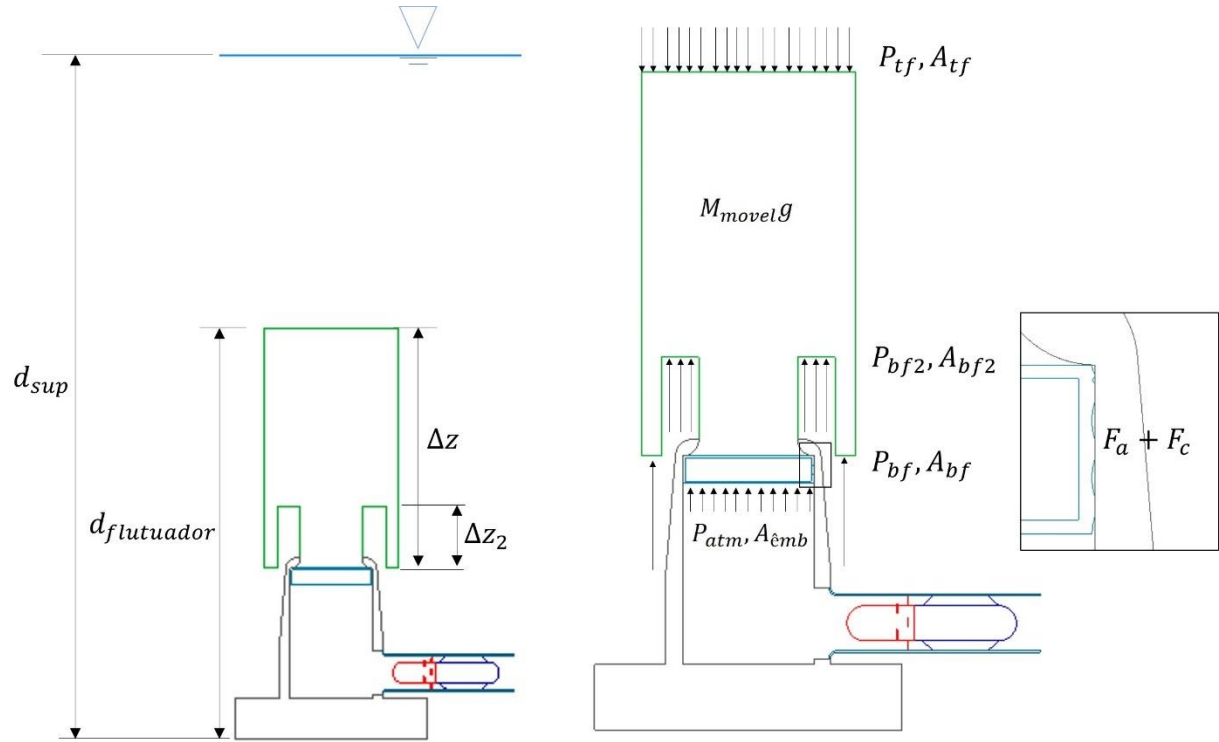
Inicialmente ponderou-se num flutuador que estivesse ligado ao êmbolo a partir de hastes, tal como indicado na Figura 4.1. No entanto, isto implicaria uma pressão acrescida na parte móvel pois a força de sentido descendente seria o somatório do peso da componente móvel, da pressão sobre o flutuador e também do peso da água sobre o próprio êmbolo. Em alternativa propôs-se ligar o flutuador diretamente ao êmbolo. O dimensionamento correto da forma desta componente é crucial para o bom desempenho de todo o protótipo. Define-se o flutuador como sendo um volume não-deformável limitado por uma membrana fina e rija de massa desprezável. Assim a densidade média do flutuador é aproximadamente igual à densidade média do ar atmosférico nele contido.

A componente móvel (êmbolo e flutuador) deve baixar quando a superfície da água atinge um certo Nível de Operação Superior (NOS) e deve voltar a subir para um Nível de Operação Inferior (NOI). A impulsão exercida no flutuador pode ser calculada pela diferença entre a pressão na sua base e a pressão no topo. Durante a análise numérica será considerada uma coluna de água com altura igual por cima de todos os pontos do flutuador, para um dado intervalo de tempo: esta aproximação será tanto mais válida quanto menor for a área do topo ( $A_{tf}$ ) o que levou ao dimensionamento de uma área de topo relativamente pequena, mas uma altura do flutuador mais acentuada, assemelhando a forma a um cilindro vertical longo. O perfil circular (visto de cima) deverá contribuir para uma redução do arrasto no sentido horizontal.

Na Figura 4.2 encontra-se um esquema do balanço das forças que atuam na componente móvel quando esta se encontra parada. As medidas  $d_{flutMIN}$  e  $d_{flutMAX}$  designam, respetivamente, a menor e maior distância do topo do flutuador em relação ao fundo do oceano. Nos cálculos apresentados,  $\Delta z = 7\ m$ , é a diferença de cotas entre a base e o topo do flutuador e  $\Delta z_2 = 1,3\ m$  é a distância entre as duas bases.

As grandezas  $d_{sup}$  e  $d_{flutuador}$  representam, respetivamente, a distância entre a superfície da água e do topo do flutuador em relação ao fundo.  $M_{móvel}$  é o somatório da massa do êmbolo e do flutuador,  $P_{tf}$  corresponde à pressão exercida sobre o topo do flutuador,  $P_{bf}$  a pressão exercida por baixo da base inferior de área  $A_{bf}$ ,  $P_{bf2}$  a pressão por baixo da base superior de área  $A_{bf2}$  e finalmente  $A_{emb}$  que representa a área do êmbolo por baixo do qual se verifica aproximadamente a pressão atmosférica  $P_{atm}$ .

Observa-se que a área do topo do flutuador é aproximadamente igual a  $A_{tf} \approx A_{bf} + A_{bf2} + A_{emb}$ . A situação representa o conjunto móvel na sua posição mais elevada: a diferença em relação à posição mais baixa consiste no somatório da força de contacto e de atrito que tem sentido ascendente (sinal positivo para o referencial escolhido) quando o êmbolo/flutuador se encontra em cima ou a deslocar-se para baixo e tem sentido descendente (sinal negativo para o referencial escolhido) quando a componente móvel se encontra em baixo ou a subir.



**Figura 4.2** Esquerda: distâncias relevantes na análise numérica; Direita: balanço das forças para o êmbolo/flutuador parado

- Condição de descida do Flutuador

Para o conjunto descer é necessário verificar-se, para  $d_{sup} = NOS$  e  $d_{flutuador} = d_{flutMAX}$ :

$$\begin{aligned}
 & A_{bf}P_{tf} + A_{bf2}P_{bf2} + A_{emb}P_{atm} - P_{tf}A_{tf} - M_{movel}g + F_c + F_a = 0 \\
 & \Leftrightarrow A_{bf}[P_{atm} + \rho_{agua}g(NOS - d_{flutMAX} + \Delta z)] \\
 & + A_{bf2}[P_{atm} + \rho_{agua}g(NOS - d_{flutMAX} + \Delta z - \Delta z_2)] + A_{emb}P_{atm} \\
 & - (A_{bf} + A_{bf2} + A_{emb})[P_{atm} + \rho_{agua}g(NOS - d_{flutMAX})] - M_{movel}g \\
 & + F_c + F_a = 0 \\
 & \Leftrightarrow A_{bf} + A_{bf2} \left(1 - \frac{\Delta z_2}{\Delta z}\right) = \frac{A_{emb}(NOS - d_{flutMAX})}{\Delta z} + \frac{M_{movel}g - (F_c + F_a)}{\rho_{agua}g\Delta z}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

- Condição de subida do Flutuador

Aplicando o mesmo procedimento para  $d_{sup} = NOI$  e  $d_{flutuador} = d_{flutMIN}$  conclui-se:

$$A_{bf} + A_{bf2} \left(1 - \frac{\Delta z_2}{\Delta z}\right) = \frac{A_{emb}(NOI - d_{flutMIN})}{\Delta z} + \frac{M_{movel}g + F_c + F_a}{\rho_{agua}g\Delta z} \tag{4.13}$$

Igualando as equações 4.12 e 4.13 vem:

$$\begin{aligned}
 & \frac{A_{emb}(NOS - d_{flutMAX})}{\Delta z} - \frac{A_{emb}(NOI - d_{flutMIN})}{\Delta z} = \frac{2(F_c + F_a)}{\rho_{agua}g\Delta z} \\
 & \Leftrightarrow NOS - NOI - (d_{flutMAX} - d_{flutMIN}) = \frac{2(F_c + F_a)}{A_{emb}\rho_{agua}g}
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

O termo da esquerda na equação 4.14 será designado por dimensão característica do protótipo ( $Dim$ ), que toma obrigatoriamente um valor não-nulo e positivo e contém informação importante relativamente às limitações do sistema. No caso ideal aproveitar-se-ia qualquer amplitude de onda, isto é, o êmbolo desce quando a superfície da água é superior ao nível médio ( $d_{sup} > d$ ) e sobe no caso contrário ( $d_{sup} < d$ ). No entanto, isto é impossível, pois a situação descrita equivale a dizer que  $NOS = NOI$ , pelo que  $Dim < 0$ , o que não pode acontecer. Outro aspeto desejável seria uma amplitude de deslocamento grande para o êmbolo ( $d_{flutMAX} - d_{flutMIN}$ ), visto que isto se traduz em mais tempo de operação para a turbina. Porém, quanto maior for a diferença entre a posição superior e inferior do flutuador, maior terá que ser  $NOS - NOI$ , ou seja, maiores terão que ser as ondas para o sistema operar. Por fim, apesar da força de contacto dos anéis estabilizadores ser dimensionável, a contribuição da força de contacto por parte do anel de vedação é sempre elevada. Se a força de contacto fosse exclusivamente resultado da força normal entre o cilindro e o anel estabilizador ( $F_c = F_{c,av}$ ), então  $DIM = 0,61 m$ . Este valor representa o valor mínimo da dimensão característica.

Tendo em conta estas limitações optou-se por uma amplitude de deslocamento de apenas  $1 m$  e  $Dim = 0,65 m$ . Assim,  $NOS - NOI = 1,65 m$ , como tal, o protótipo não irá operar para ondas com altura inferior a  $1,65 m$ . Escolheu-se centrar o nível médio da água,  $d = 20 m$ , entre  $NOS$  e  $NOI$ , logo:

$$\begin{aligned} NOS &= 20,825 m \\ NOI &= 19,175 m \end{aligned} \tag{4.15}$$

Com estas propriedades calcula-se a força de contacto total dos anéis estabilizadores. Sabendo que  $F_c + F_a = F_c(1 + \mu) = (F_{c,av} + F_{c,ae})(1 + \mu)$ , da equação 4.14 vem que:

$$F_{c,ae} = \frac{0,5A_{emb}\rho_{agua}g \cdot Dim}{1 + \mu} - F_{c,av} = 819 N \tag{4.16}$$

Para determinar a área da base inferior atribui-se um valor ponderado à área da base superior na equação 4.12 ou 4.13 modelando a forma final do flutuador no AutoCAD. Desta forma obteve-se  $A_{bf2} = 3,5 m^2$ .

Com as componentes básicas dimensionadas parte-se agora para a análise numérica do protótipo. Supõe-se que a conduta de ar e a estrutura de troca de ar à superfície são largos o suficiente para não causarem impacto negativo no deslocamento do ar. Como tal, não se verificam perdas de carga que, de outra forma, teriam que ser tomadas em consideração no momento do balanço de forças.



### 4.3 Análise numérica

A análise computacional do desempenho do protótipo tem por base o balanço das forças que atuam na componente móvel. Para determinar a força resultante é necessário identificar as forças que atuam a favor e contra o deslocamento do êmbolo e definir as expressões que permitem calcular a sua variação periódica.

#### 4.3.1 Forças opostas ao deslocamento do êmbolo

Com as características de funcionamento definidas, garantiu-se a capacidade de subida e descida do êmbolo. No entanto, quando o conjunto móvel sobe ou desce, surgem várias forças de sentido oposto ao movimento que dependem da velocidade de deslocamento: a força de arrasto (*drag*) que atua no flutuador ( $F_d$ ); a força por baixo do êmbolo devido à variação da pressão entre o cilindro da câmara-de-ar e o segmento da turbina ( $F_{press}$ ); a força por baixo do êmbolo devido à queda de pressão (*pressure drop*) entre os planos do rotor da turbina, ( $F_{pd}$ ).

##### 1) Força de arrasto

A força de arrasto depende da densidade da água  $\rho_{\text{água}}$ , do quadrado da velocidade do flutuador  $v_{\text{flutuador}}$ , do coeficiente de arrasto  $C_d$  e da área projetada  $A_d$  que enfrenta o fluido.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_{\text{água}} A_d v_{\text{flutuador}}^2 \quad (4.17)$$

O coeficiente de arrasto tende a ser uma função do número de Reynolds ( $Re$ ) que, por sua vez, varia com a densidade do fluido, a viscosidade dinâmica ( $\mu_{\text{água}}$ ), a velocidade relativa do flutuador em relação à água e a altura do flutuador ( $\Delta z$ ):

$$Re = \frac{\rho_{\text{água}} v_{\text{flutuador}} \Delta z}{\mu_{\text{água}}} \quad (4.18)$$

$C_d$  diminui tipicamente para números de Reynolds elevados, isto é, fluxos em regime de turbulência. Supondo que  $v_{\text{flutuador}} > 1 \text{ m/s}$  e sabendo que  $\mu_{\text{água}} = 0.00123 \text{ Ns/m}^2$  (aos  $15^\circ\text{C}$ ), então  $Re > 5,9 \times 10^6$ . Assim, em geral, deve-se contar com um fluxo em regime turbulento e coeficientes de arrasto reduzidos para uma determinada forma escolhida.

No presente estudo supôs-se um coeficiente de arrasto constante variando apenas no sentido de deslocação do conjunto móvel: ao subir tem-se  $C_d = C_{d,UP} = 0,8$ , correspondente ao coeficiente de arrasto para um cilindro longo. A área de arrasto, neste caso, corresponde à área do topo do flutuador,  $A_{d,UP} = A_{tf}$ . Ao descer optou-se por  $C_d = C_{d,DOWN} = 1$ , o coeficiente que diz respeito a um objeto côncavo para  $Re \approx 10^4$ . Nesta situação, a área de arrasto será  $A_{d,DOWN} = A_{bf} + A_{bf2}$ . O arrasto provocado pelo ar por baixo do êmbolo foi considerado desprezável devido à grande diferença de densidades entre o ar e a água.

##### 2) Força devido à variação da pressão entre secções

Quando o êmbolo força ar para fora ou para dentro do segmento da turbina, o fluido de trabalho passa por secções com áreas diferentes. Sendo  $A_{turb}$  a área varrida pela turbina e  $V_x$  a velocidade do fluxo que passa nesta mesma secção, pela equação da continuidade vem que:

$$\begin{aligned} A_{turb} V_x &= A_{\text{emb}} v_{\text{flutuador}} \Leftrightarrow V_x = \frac{A_{\text{emb}} v_{\text{flutuador}}}{A_{turb}} \Leftrightarrow V_x = \frac{A_{\text{emb}} v_{\text{flutuador}}}{\frac{\pi}{4} (D_t^2 - D_h^2)} \\ &\Leftrightarrow V_x = \frac{4 A_{\text{emb}} v_{\text{flutuador}}}{\pi D_t^2 (1 - h^2)} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Consequentemente existe uma variação de pressão entre o segmento da turbina e o cilindro:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_{ar} (V_x^2 - v_{flutuador}^2) \quad (4.20)$$

Da equação 4.20 determina-se a expressão para a contribuição da força por baixo do êmbolo devido à variação da pressão entre as duas secções:

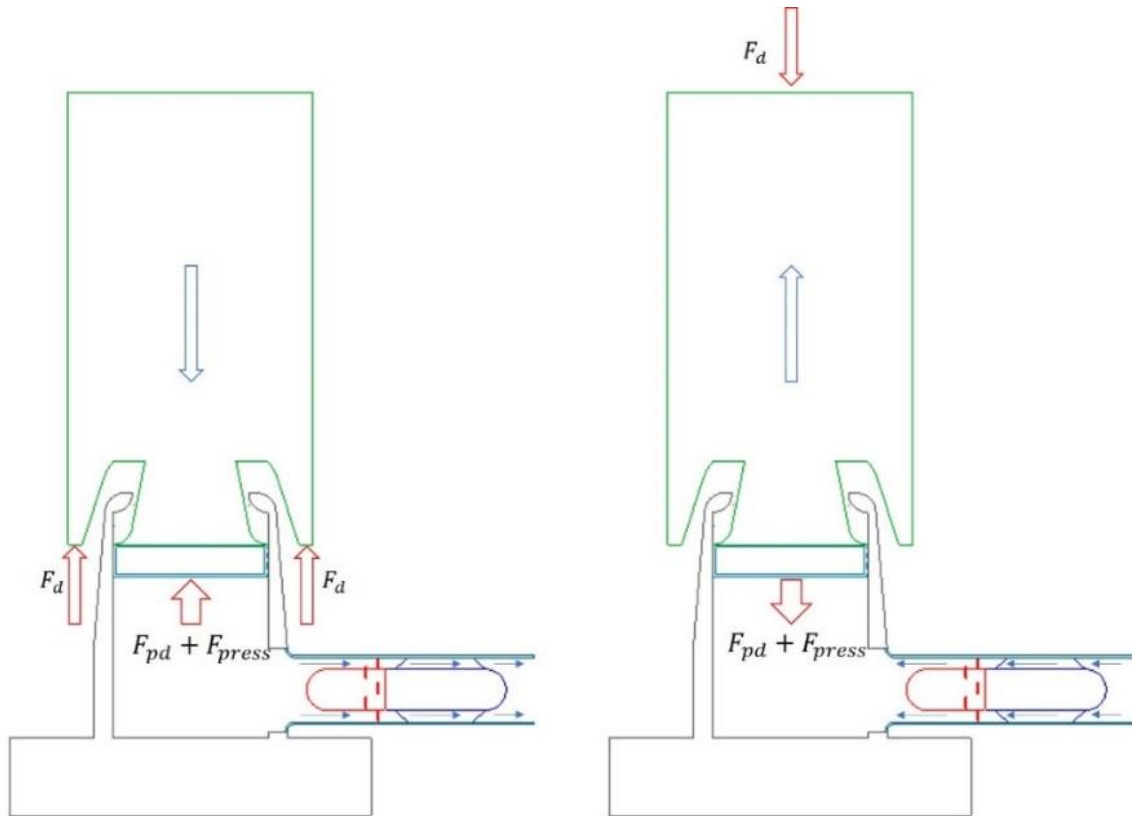
$$F_{press} = \frac{1}{2} A_{emb} \rho_{ar} (V_x^2 - v_{flutuador}^2) \quad (4.21)$$

### 3) Força devido à queda de pressão

A função da turbina é converter a energia pneumática do fluxo incidente nas pás em energia mecânica. Quando isto acontece, a pressão e a velocidade do fluxo diminuem entre os dois planos do rotor. A variação de pressão é dada pela equação 4.10 e permite definir a expressão para o cálculo da força por baixo do êmbolo devido ao *pressure drop* através da turbina:

$$F_{pd} = A_{emb} \Delta p_0^* \rho \omega_t^2 R_t^2 \quad (4.22)$$

A Figura 4.3 esquematiza o sentido das forças definidas anteriormente.



**Figura 4.3** Forças dependentes da velocidade do flutuador. Esquerda: Componente móvel a descer. Direita: Componente móvel a subir

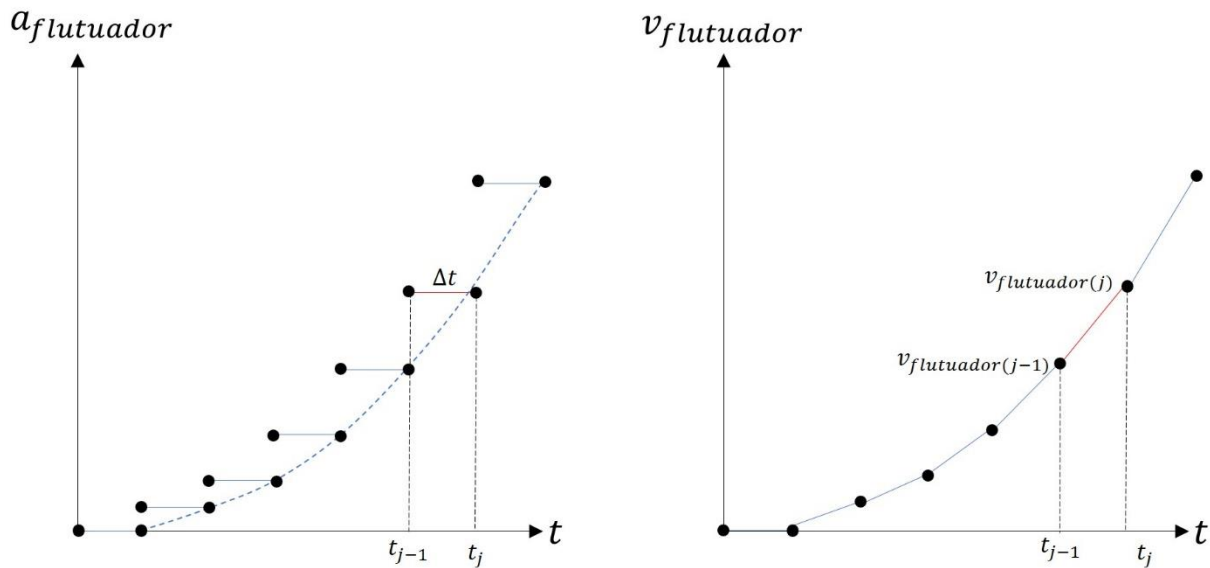
### 4.3.2 Força resultante

De modo a analisar o progresso vertical do flutuador/êmbolo procede-se com a determinação da força resultante. Quando o êmbolo parte da sua posição de repouso, num dado instante, desloca-se a uma certa velocidade que depende da força que atua sobre esta componente e o flutuador e as forças que se opõem ao movimento. Como se verifica pelas equações 4.17, 4.21 e 4.22, as forças opostas são, paradoxalmente, funções da velocidade instantânea que se pretende calcular, portanto será necessário desenvolver um algoritmo e aplicar ciclos iterativos que permitam solucionar este problema. Para facilitar a resolução supõe-se uma força resultante ( $F_R$ ) constante num dado intervalo de iteração  $\Delta t$ . Esta aproximação é tanto mais precisa quanto menor for o intervalo considerado. Para este estudo considerou-se  $\Delta t = 0,01$  s, pois para intervalos de tempo superiores não se verificaram diferenças relevantes nos resultados obtidos em relação aos que foram adquiridos para a análise num passo da centésima de segundo. Um aumento de  $\Delta t$  ir-se-ia apenas traduzir num tempo de cálculo superior do algoritmo, reduzindo o seu desempenho.

A força resultante é dada pelo balanço de forças de sentido ascendente e descente:

$$F_R(j) = F_{Up}(j) - F_{Down}(j) \quad (4.23)$$

O algoritmo irá analisar as condições iniciais e finais de um determinado intervalo  $t_{j-1}$  a  $t_j$ , tal como sugerido na Figura 4.4, tirando conclusões sobre a força resultante, deslocamento do êmbolo e atividade da turbina, no início do intervalo seguinte.



**Figura 4.4** Método de resolução da força resultante. Esquerda: aceleração do flutuador. Direita: velocidade do flutuador

Uma vez que a aceleração é considerada constante em cada intervalo de tempo, a velocidade varia de forma linear em cada  $\Delta t$ . Pelas equações do movimento e a segunda lei de Newton escreve-se:

$$a_{flutuador}(j) = \frac{F_R(j-1)}{M_{móvel}} \quad (4.24)$$

$$v_{flutuador}(j) = v_{flutuador}(j-1) + a_{flutuador}(j)\Delta t \quad (4.25)$$

A partir daqui o algoritmo terá que identificar e abordar as várias situações possíveis de deslocamento ou de estado estacionário do êmbolo e da respetiva velocidade de rotação da turbina. Isto é, êmbolo

parado em cima, êmbolo a deslocar-se para baixo, êmbolo parado em baixo e êmbolo a deslocar-se para cima.

#### 4.3.2.1 Condição 1: Êmbolo parado em cima

Se a força resultante do instante anterior apresenta sinal positivo e, nesse mesmo instante, o topo do flutuador se encontra na sua posição superior, ele está parado. Neste caso, a posição do êmbolo permanece a mesma ( $d_{flutuador}(j) = d_{flutuador}(j-1)$ ). Recordando que as notações  $tf$ ,  $bf$  e  $bf2$  designam, respetivamente, o topo, a base inferior e a base superior do flutuador, as forças de sentido descendente e ascendente do instante atual são dadas por:

$$F_{Down}(j) = (A_{tf})[P_{atm} + \rho_{agua}g(d_{sup}(j) - d_{flutuador}(j))] + M_{móvel}g \quad (4.26)$$

$$\begin{aligned} F_{Up}(j) &= A_{bf}[P_{atm} + \rho_{agua}g(d_{sup}(j) - d_{flutuador}(j) + \Delta z)] \\ &+ A_{bf2}[P_{atm} + \rho_{agua}g(d_{sup}(j) - d_{flutuador}(j) + \Delta z - \Delta z_2)] + A_{emb}P_{atm} \\ &+ F_c + F_a \end{aligned} \quad (4.27)$$

Como não existe fluxo de ar, no caso de a turbina continuar a rodar devido ao impulso anterior, existe um decréscimo periódico na sua velocidade. O rotor conserva algum momento angular depois de a força propulsora deixar de existir. Isto acontece devido à energia de rotação adquirida que depende do momento de inércia e da massa do rotor. O tempo que a turbina continua a rodar varia consoante os atritos mecânicos do sistema e, no caso de haver ligação com um gerador elétrico, depende também da carga elétrica ligada ao mesmo. Uma vez que esta temática, só por si, requiere uma análise complexa e extensa, que não se enquadra no âmbito do estudo, optou-se simplesmente por atribuir um valor de decréscimo periódico de rotação ( $DPR$ , em %) para cada intervalo  $\Delta t$ . Assim, quando não existe fluxo para impulsionar a turbina, a sua velocidade de rotação, em  $rpm$ , é dada por:

$$RPM(j) = DPR \cdot RPM(j-1) \quad (4.28)$$

Quando a força resultante passa a ser negativa o êmbolo inicia a descida, validando a condição 2.

#### 4.3.2.2 Condição 2: Êmbolo a descer com velocidade variável

Se a força resultante do instante anterior for negativa e a posição do topo do flutuador nesse mesmo instante for superior à sua posição mínima ( $d_{flutMIN}$ ), o êmbolo estará a descer com velocidade variável. Neste caso, podem-se suceder dois cenários:

a) O êmbolo desce e a turbina é acionada pelo fluxo de ar resultante

Quando a turbina é impulsionada pelo fluxo de ar incidente, verifica-se que:

$$U_t(j) = \frac{V_x(j)}{\phi} \quad RPM(j) = \frac{60}{2\pi R_t} U_t(j) \quad \omega_t(j) = RPM(j) * \frac{2\pi}{60} \quad (4.29)$$

Assim, pela definição de  $V_x$  da equação 4.19:

$$RPM(j) = \frac{240A_{emb}v_{flutuador}(j)}{\phi\pi^2 D_t^3(1-h^2)} \quad (4.30)$$

Através das equações 4.24 e 4.25 é feita a primeira estimativa da aceleração e da velocidade final do intervalo  $t_{j-1}$  a  $t_j$ . Seguidamente corrige-se estas variáveis, incluindo a ponderação do conjunto de forças que se opõem ao movimento. Pela aproximação proposta,  $v_{flutuador}$  varia linearmente em  $\Delta t$ , portanto, para caracterizar a força resultante num determinado intervalo de tempo considerou-se a velocidade média para estimar  $F_{pd,médio}$ ,  $F_{press,médio}$  e  $F_{d,médio}$  (Apêndice C, Figura C.1, pág. 81).

Sabendo a velocidade em  $t_j$  e a aceleração entre  $t_{j-1}$  a  $t_j$ , determina-se a posição final do topo do flutuador através das equações do movimento:

$$d_{flutuador}(j) = d_{flutuador}(j-1) - (v_{flutuador}(j)\Delta t - 0,5a_{flutuador}(j)\Delta t^2) \quad (4.31)$$

Finalmente calcula-se a força resultante em  $t_j$ . As forças de sentido descendente continuam a ser as da equação 4.26 e as forças de sentido ascendente correspondem a 4.27 somando ainda a contribuição de  $F_{pd}(j)$ ,  $F_{press}(j)$  e  $F_d(j)$ .

b) O êmbolo desce, mas o fluxo de ar não é suficiente para acionar a turbina

Isto deverá ocorrer imediatamente depois do êmbolo iniciar o movimento no caso de a velocidade de rotação da turbina ainda ser elevada como resultado do impulso anterior durante a subida. A única diferença face à situação descrita em a) reside na ausência de *pressure drop* uma vez que o fluxo de ar provocado pelo deslocamento do êmbolo, tem velocidade reduzida e não exerce trabalho útil nas pás do rotor.

Os ciclos iterativos passam pela condição 2 até as forças resistivas igualarem o peso da componente móvel e a força aplicada sobre o flutuador. Nesse caso,  $F_R = 0$ , sem o êmbolo ter atingido a sua posição inferior, consequentemente todo o conjunto desce com velocidade constante, procedendo-se com a análise numérica da condição 3.

#### 4.3.2.3 Condição 3: Êmbolo a deslocar-se com velocidade constante

Sem esta condição limitante o algoritmo supõe que o conjunto das forças resistivas obriga o êmbolo a mudar de sentido de deslocamento quando a força resultante inverte o seu sentido. No entanto, sendo  $F_{pd}$ ,  $F_{press}$  e  $F_d$  forças reativas em função de  $v_{flutuador}$ , na prática, esta situação não acontece. O que a condição 3 impõe é apenas a conservação da mesma velocidade e forças opostas ao movimento até ser atingido  $d_{flutMIN}$  (se o êmbolo estiver a descer) ou  $d_{flutMAX}$  (se o êmbolo estiver a subir).

#### 4.3.2.4 Condição 4: Êmbolo parado em baixo

Quando o êmbolo atinge a sua posição mais baixa a coluna de água por cima do flutuador ainda deverá estar a aumentar de tamanho até a crista da onda passar por cima do sistema. Quando  $d_{sup}$  diminui,  $F_c + F_a$  muda de sentido, em termos vetoriais, fazendo parte das forças de sentido descendente. Antes de as forças de sentido positivo e negativo se igualarem novamente, dando início ao movimento de subida, elas serão respetivamente dadas por:

$$F_{Down}(j) = (A_{tf})[P_{atm} + \rho_{agua}g(d_{sup}(j) - d_{flutuador}(j))] + M_{móvel}g + F_c + F_a \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} F_{Up}(j) &= A_{bf}[P_{atm} + \rho_{agua}g(d_{sup}(j) - d_{flutuador}(j) + \Delta z)] \\ &+ A_{bf2}[P_{atm} + \rho_{agua}g(d_{sup}(j) - d_{flutuador}(j) + \Delta z - \Delta z_2)] + A_{emb}P_{atm} \end{aligned} \quad (4.33)$$

Semelhante à condição 1 a turbina roda apenas devido à energia rotativa adquirida, desacelerando de acordo com o *DPR* atribuído.

#### 4.3.2.5 Condição 5: Êmbolo a subir com velocidade variável

Quando a força resultante muda de sentido, as características atribuídas ao flutuador permitem a subida da componente móvel quando  $d_{sup} = NOI$ . Tal como na condição 2 o fluxo de ar de um determinado

instante pode, ou não, ser suficiente para operar a turbina e para cada uma destas duas situações aplica-se o ciclo iterativo para corrigir o valor da velocidade final do intervalo de tempo a analisar.

Neste caso em particular, como o flutuador sobe:

$$d_{flutuador}(j) = d_{flutuador}(j-1) + (v_{flutuador}(j)\Delta t - 0,5a_{flutuador}(j)\Delta t^2) \quad (4.34)$$

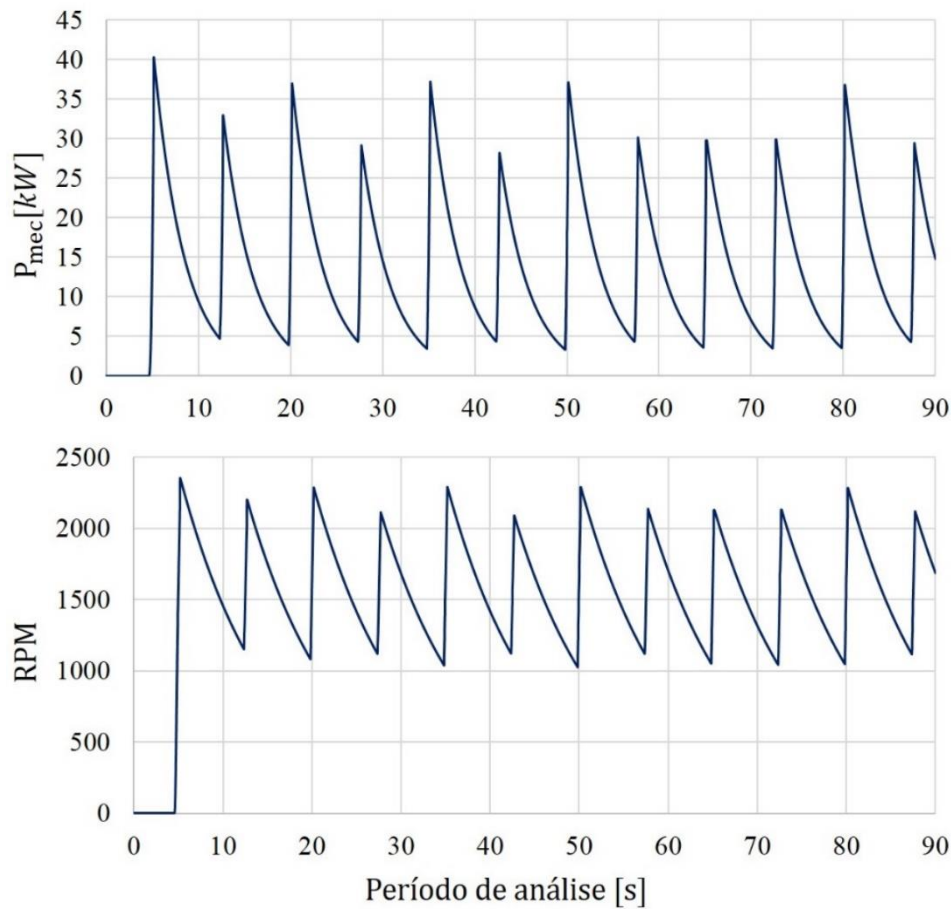
As forças de sentido descendente são dadas pelo somatório de 4.32 e  $F_{pd}(j) + F_{press}(j) + F_d(j)$ . A condição 5 será válida até o algoritmo supor a inversão do sinal da força resultante, quando o flutuador se encontra a subir: nesse caso aplica-se a condição 3 até ser atingida a posição superior. A análise numérica para  $N$  ondas iguais termina quando  $t_j = NT$ .

#### 4.3.3 Geração de energia elétrica

No mesmo algoritmo analisou-se a variação do binário mecânico produzido pelo rotor, através da equação 4.11 e determinou-se a potência mecânica gerada pela turbina. Esta corresponde ao produto entre o binário mecânico e a velocidade angular do rotor em cada instante:

$$P_{mec}(j) = T(j)\omega_t(j) \quad (4.35)$$

O  $DPR$  foi sempre considerado 0,999, ou seja, em cada centésima de segundo a velocidade de rotação da turbina decresce em 0,1% quando o êmbolo se encontra parado. A Figura 4.5 representa os gráficos resultantes da análise numérica da resposta do protótipo a  $N = 6$  ondas consecutivas para a potência mecânica e velocidade de rotação da turbina.



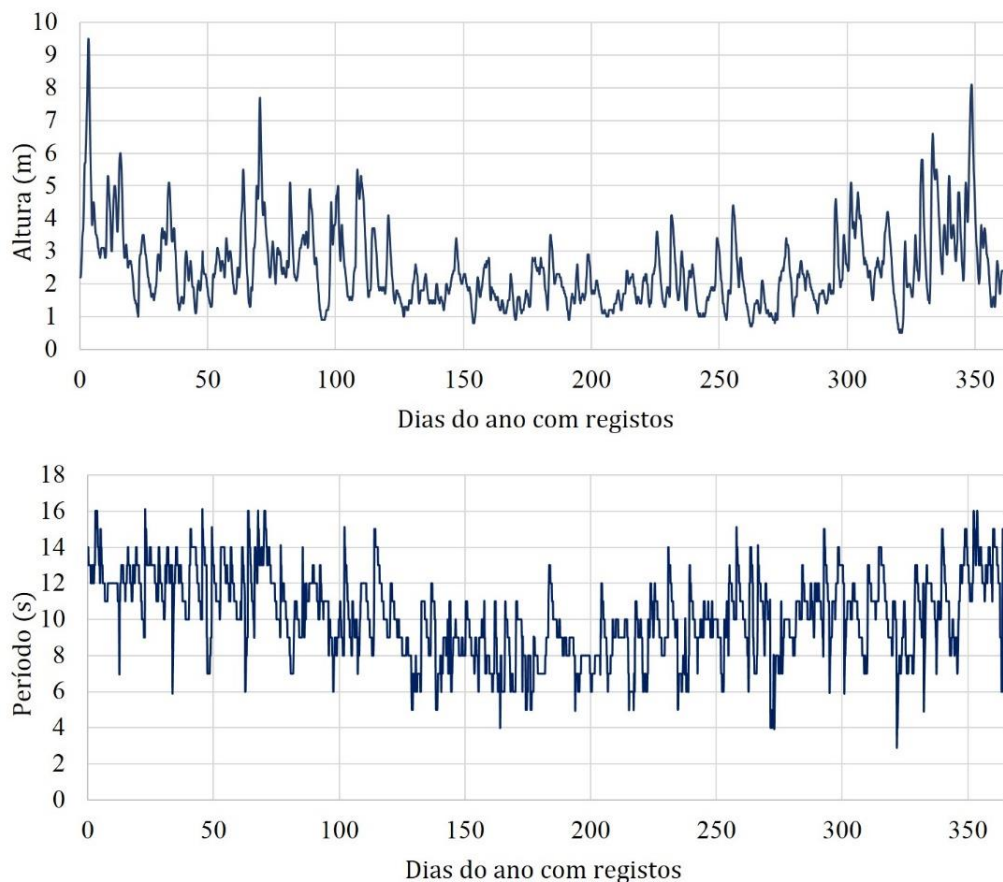
**Figura 4.5** Análise numérica do protótipo para  $N=6$  ondas consecutivas com Altura  $H=5m$  e período  $T=15s$ . Em cima: Potência mecânica em kW. Em baixo: velocidade de rotação da turbina em rpm

Verifica-se que, mesmo para ondas grandes, a velocidade de rotação máxima da turbina não ultrapassa 2500 *rpm*. Unindo um gerador elétrico ao eixo da turbina, se o sistema electroprodutor for ligado à rede elétrica, a sua frequência não deve ser superior à frequência da rede. A frequência da corrente trifásica no gerador  $f$  depende da velocidade de rotação da turbina e do número de polos ( $N_p$ ) da máquina elétrica escolhida:

$$f = \frac{RPM \cdot N_p}{120} \quad (4.36)$$

Tendo em conta que  $f_{max} = 50 \text{ Hz}$ , então  $RPM_{max} = 3000 \text{ rpm}$ , no caso de o gerador possuir apenas 2 polos. Aplicando um gerador com 4 polos e velocidade nominal de 1500 *rpm* a potência instalada será muito inferior e assim também a eficiência global da conversão da energia das ondas. No entanto, a frequência produzida torna-se mais apropriada à rede. Por essa razão escolheu-se um gerador síncrono de 4 polos e velocidade nominal de 1500 *rpm*. Pela Figura 4.5 prevê-se que o sistema opere à potência nominal em pequenos períodos de tempo apresentando flutuações acentuadas na produção.

Estenderam-se as funcionalidades do algoritmo inicial para uma escala anual, inserindo o ciclo original (exclusivo para uma determinada amplitude e período de onda) dentro de um ciclo principal que permitisse a análise tri-horária ao longo de um ano. Os dados de amplitude e período de um determinado ano foram retirados do site *windguru* e dizem respeito a médias tri-horárias. O algoritmo analisa um par (Amplitude, Período) de um determinado espaço de tempo de 3 horas e considera as  $N$  ondas consecutivas como representativas para a média durante essas 3 horas. Os gráficos seguintes exemplificam um *input* para o algoritmo da análise anual:



**Figura 4.6** Input do algoritmo para o ano 2008. Em cima: Espectro de alturas significativas tri-horárias; em baixo: Espectro de períodos médios tri-horários

Tendo definido uma velocidade máxima para a rotação da turbina limita-se também a potência mecânica máxima que é possível produzir:

$$\begin{aligned} P_{\text{mec,max}} &= T_{\text{max}} \omega_{t,\text{max}} = C_T \rho_{\text{ar}} \omega_{t,\text{max}}^3 R_t^5 = C_T \rho_{\text{ar}} \left( \frac{2\pi}{60} \text{RPM}_{\text{max}} \right)^3 R_t^5 \\ &= 10,39 \text{ kW} \end{aligned} \quad (4.37)$$

Com base em estudos e artigos científicos que demonstram a possibilidade de elevada eficiência para geradores síncronos de ímanes permanentes <sup>[34] [35]</sup> atribuiu-se uma eficiência de  $\eta_G = 85 \%$  à máquina elétrica. A eficiência deste tipo de geradores tende a ser maior para cargas elétricas e velocidade de rotação elevadas variando entre 80 e 93 %. Assim, a potência nominal fica:

$$P_{\text{nom}} = \eta_G P_{\text{mec,max}} = 8,8 \text{ kW} \quad (4.38)$$

A eficiência global (%) de todo o processo de conversão, desde a energia total da onda ( $E_{\text{onda}}$ ) até à energia elétrica à saída do gerador ( $E_{\text{elec}}$ ) é, anualmente, dada por:

$$\varepsilon_{\text{global}} = \frac{E_{\text{elec}}}{E_{\text{onda}}} = \frac{\sum P_{\text{med,h}}}{\sum P_{\text{onda,h}}} \times 100 \quad (4.39)$$

$\sum P_{\text{med,h}}$  é o somatório da potência elétrica média a cada 3 horas durante um ano.  $\sum P_{\text{onda,h}}$  diz respeito ao somatório da potência média da onda nos mesmos intervalos de tempo e pode ser calculado a partir de:

$$P_{\text{onda,h}} = \frac{1}{4T} \rho_{\text{água}} g H^2 \lambda \sqrt{\frac{A_{tf}}{\pi}} \quad (4.40)$$

A equação 4.40 traduz a potência média da onda para toda a largura que passa por cima do flutuador, isto é, quanto mais largo for o topo do flutuador, maior é a quantidade de energia total que passa por cima do sistema, por onda.

O fator de capacidade é outro indicador da produtividade de um sistema electroprodutor e, em termos anuais, pode ser definido pelo quociente entre a potência anual média ( $P_{\text{med,ano}}$ ) e a potência nominal do protótipo:

$$FC_{\text{ano}} = \frac{P_{\text{med,ano}}}{P_{\text{nom}}} \quad (4.41)$$

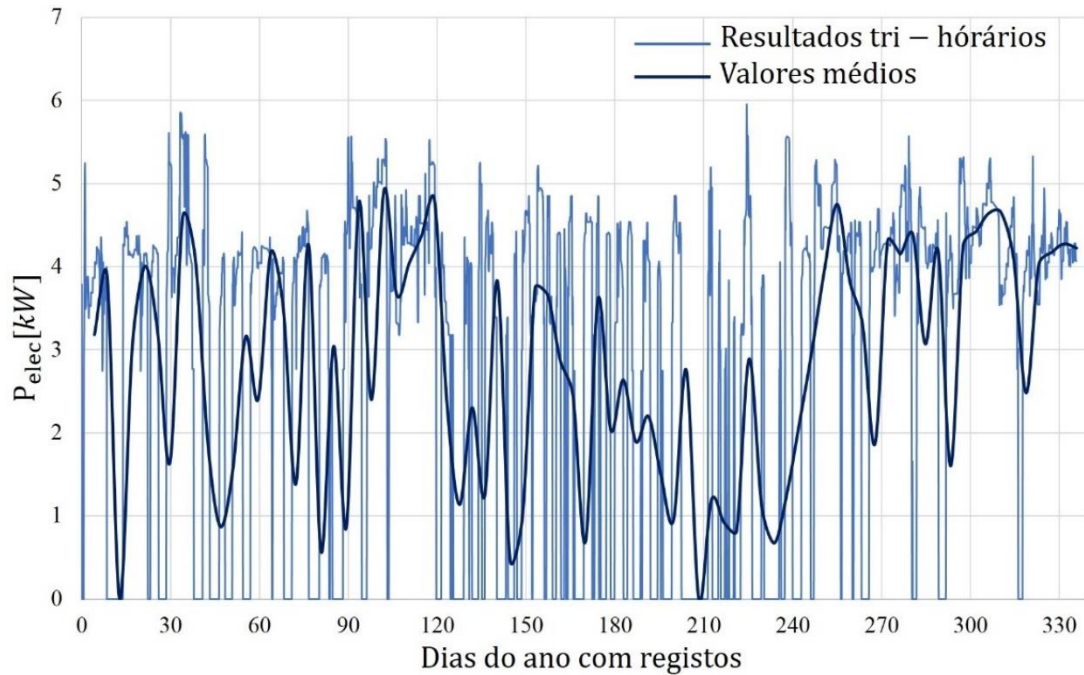
À partida, se a ondulação de um dado ano for mais fraca, isto é, se a altura média das ondas for mais reduzida, o sistema irá operar durante menos horas e o output energético será menor. Por outro lado, se a ondulação for mais intensa o modelo deverá produzir mais energia. Os ensaios numéricos que se seguiram tiveram como objetivo averiguar a diferença entre um ano de ondulação anual média forte e fraca no que diz respeito à energia produzida, potência anual média, eficiência global, fator de capacidade e número de horas de produção.

#### 4.3.3.1 Produção num ano de ondulação fraca

Num ano de fraca ondulação média, como foi o caso de 2012 (altura significativa anual  $H_s = 2,2 \text{ m}$ ) o algoritmo estima os resultados da Figura 4.7 e da Figura 4.8. Das 8058 horas de registos, o protótipo operou durante 5394 horas e apresentou uma potência anual média de  $2,82 \text{ kW}$  para um fator de

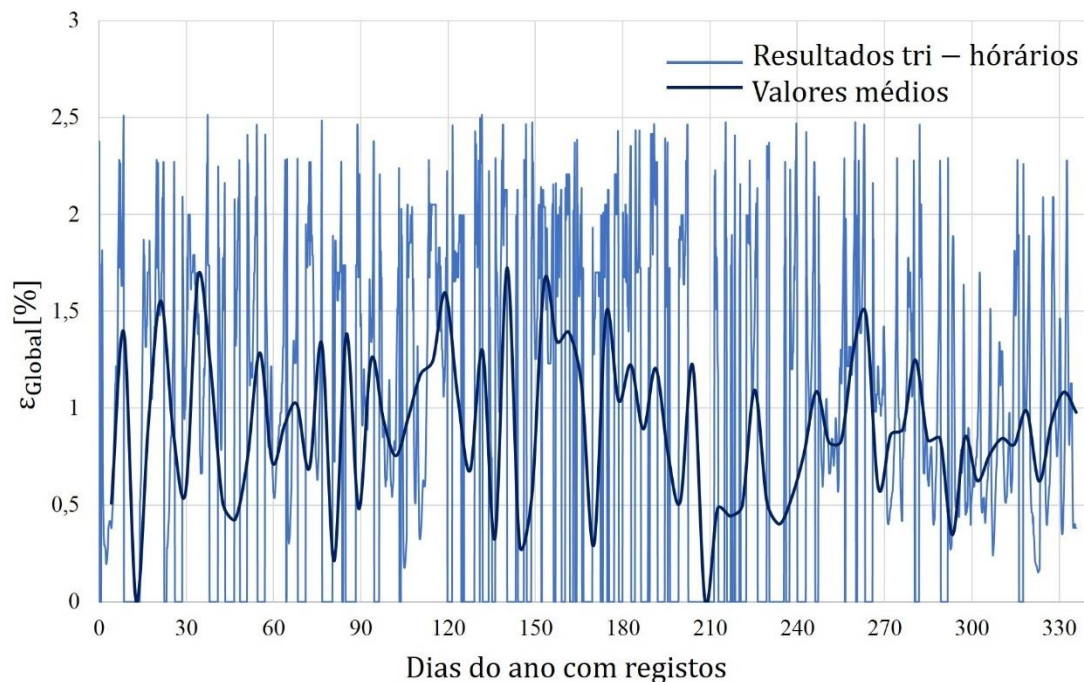


capacidade anual  $FC = 0,32$ . A energia total produzida foi  $22,69 \text{ MWh}$ . Tal como esperado, a produção diminui nos meses de verão, quando a ondulação é tipicamente mais fraca e aumenta nos meses de inverno quando ocorre ondulação, em geral, mais forte.



**Figura 4.7** Potência elétrica média tri-horária estimada para o ano 2012

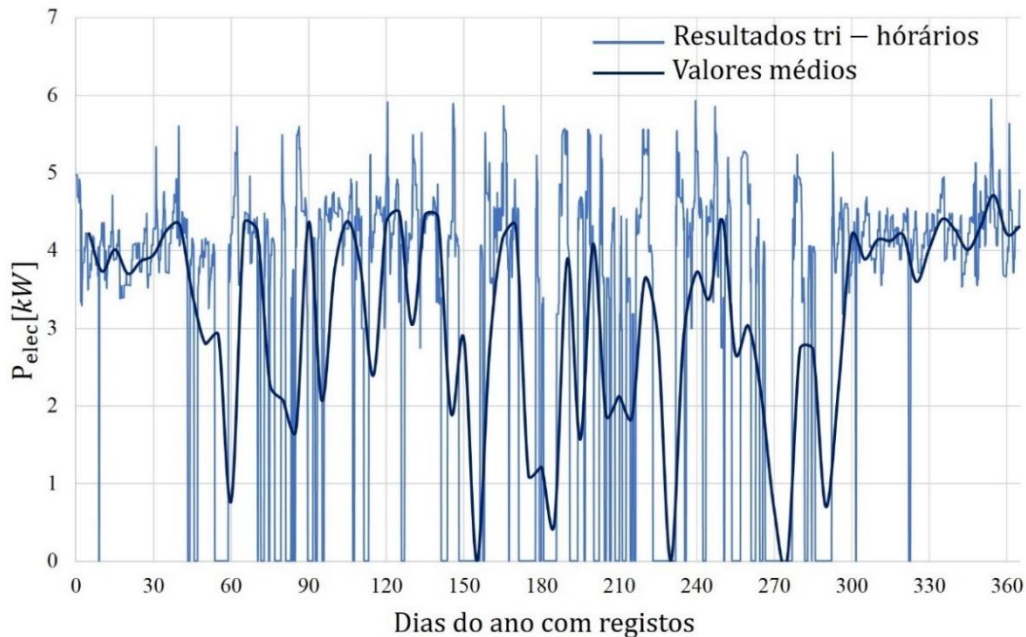
A eficiência global média variou, ao longo de um ano, entre 0 e 2,5%, apresentando um valor anual médio de 0,9 %. A eficiência da conversão será maior para as ondas com a menor amplitude admitida pelo protótipo e para períodos/comprimentos de onda reduzidos, por essa razão o protótipo opera com mais eficiência durante os meses de verão.



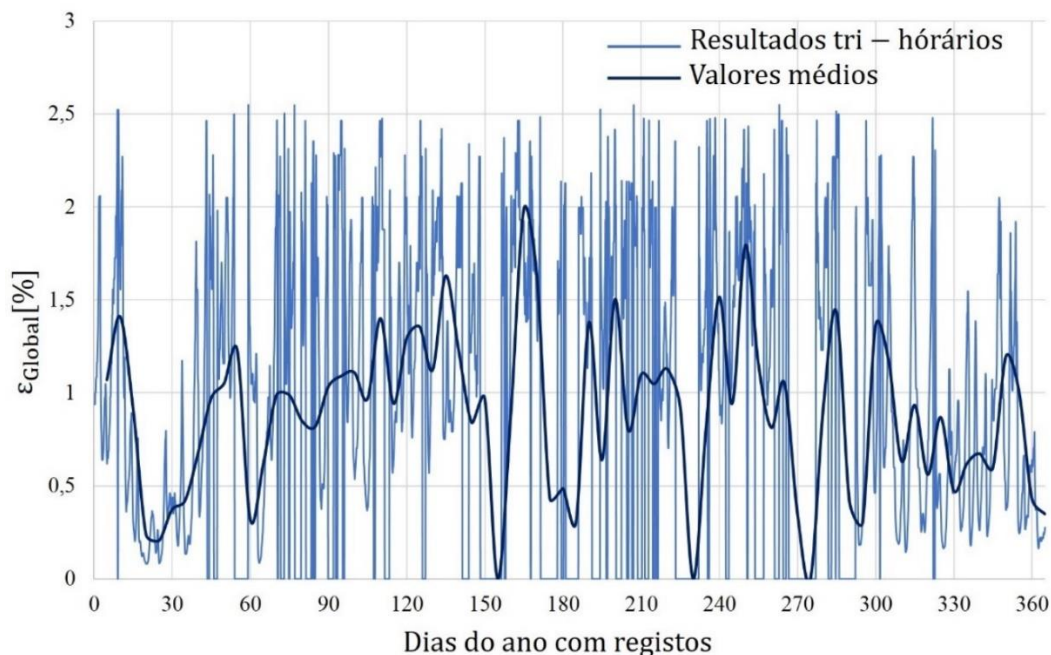
**Figura 4.8** Eficiência global média tri-horária estimada para o ano 2012

## 4.3.3.2 Produção num ano de ondulação forte

Num ano em que a ondulação se apresenta superior à média interanual (por exemplo: ano 2009 com  $H_s = 2,6\text{ m}$ ) o algoritmo prevê os resultados apresentados na Figura 4.9 e na Figura 4.10.



**Figura 4.9** Potência elétrica média tri-horária estimada para o ano 2009



**Figura 4.10** Eficiência global média tri-horária estimada para o ano 2009

O protótipo operou durante 6477 horas de entre as 8760 horas de dados registados, a uma potência média anual de  $3,14\text{ kW}$ . O fator de capacidade médio anual foi de 0,36 e a produção elétrica totalizou  $27,46\text{ MWh}$ , superando o ano de 2012 em quase  $5\text{ MWh}$ . A eficiência global média anual foi igual à do ano de fraca ondulação; observando os primeiros dois meses do ano 2009, verifica-se mais uma vez que os maiores valores de produção coincidem com as eficiências globais mais reduzidas (para o protótipo operacional).

#### 4.3.4 Otimização dos parâmetros

Alguns parâmetros do protótipo foram inicialmente atribuídos por hipótese ao invés de se basearem em fundamentos numéricos. Assim, obtiveram-se os resultados anteriores para essas mesmas características: raio do êmbolo  $R_{emb} = 1\text{ m}$ , área da base superior do flutuador  $A_{bf2} = 3,5\text{ m}^2$ , altura do flutuador  $\Delta z = 7\text{ m}$  e a forma cilíndrica do flutuador que, por sua vez, terá uma influência significativa no coeficiente de arrasto ( $C_d$ ).

Existem outros parâmetros em condições semelhantes: a altura do êmbolo ( $500\text{ mm}$ ), a espessura dos anéis estabilizadores ( $50\text{ mm}$ ) e do anel de vedação ( $5\text{ mm}$ ). A espessura dos anéis não deve ser aumentada devido à força de contacto e de atrito cujo sobredimensionamento acabaria por ter consequências negativas no *Dim*; a espessura do anel de vedação já foi considerada pequena pelo que se optou por não diminuir mais esta dimensão, sendo a característica fundamental a força de contacto; a altura do êmbolo não deverá ser relevante no desempenho do protótipo, podendo eventualmente ser diminuída para tornar a componente móvel mais leve.

O parâmetro arbitrário *DPR*, sendo dependente de vários fatores referidos anteriormente, não será analisado, aplicando-se sempre  $DPR = 0,999$ .

Assim, de modo a melhorar o desempenho do sistema, analisou-se o impacto da variação de  $R_{emb}$ ,  $A_{bf2}$ ,  $\Delta z$  e  $C_d$ , aplicando as respetivas melhorias a estes parâmetros.

Relativamente ao raio do êmbolo, se este for maior, à partida, o fluxo resultante deve aumentar para a mesma velocidade do flutuador. No entanto, existem outros parâmetros dependentes do raio do êmbolo: a força de contacto depende da área dos anéis estabilizadores e de vedação que, por sua vez, dependem do perímetro do êmbolo. Quanto maior for o êmbolo maiores serão as forças de contacto e de atrito entre este e o cilindro, dificultando o deslocamento da componente móvel. Por outro lado, um êmbolo maior traduz-se também numa subida de pressão entre o êmbolo e o segmento da turbina. Se as forças opostas ao deslocamento útil do êmbolo aumentam, a eficiência global deve diminuir como resultado das perdas energéticas.

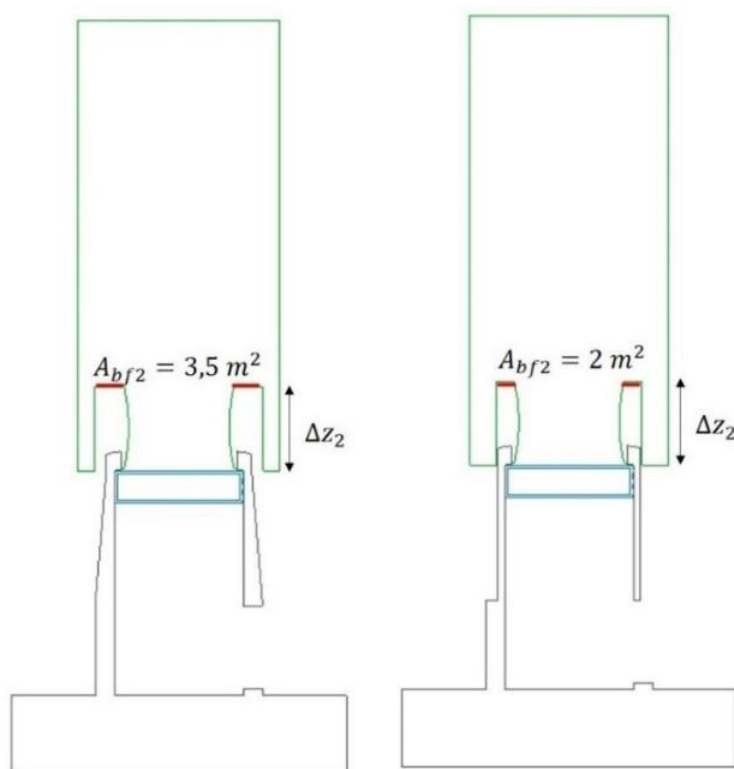
A base superior, de área  $A_{bf2}$ , é responsável pela paragem do conjunto móvel durante a descida. Um aumento desta grandeza deve traduzir-se numa diminuição da área da base inferior, para o mesmo *Dim*.

Já a variação de  $\Delta z$  - a distância entre o topo do flutuador e a base inferior - poderá ter impacto na área do topo do flutuador: mantendo  $d_{flutMAX}$  e  $d_{flutMIN}$  iguais, a única maneira de alterar  $\Delta z$  é subir ou descer a base inferior de área  $A_{bf}$ . Tornando  $\Delta z$  maior, a impulsão no flutuador aumenta e  $A_{tf}$  também terá que aumentar para garantir as mesmas condições de funcionamento impostas pelo *Dim*.

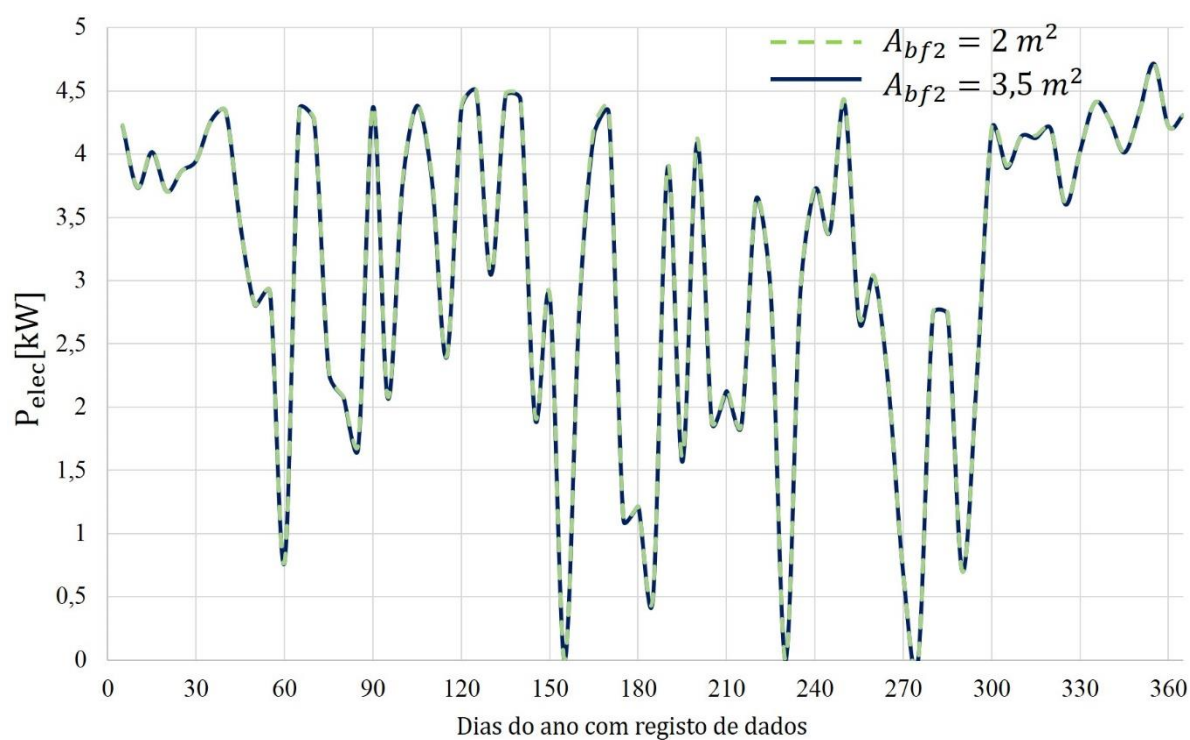
Por fim, uma redução do coeficiente de arrasto deverá resultar em forças de arrasto mais reduzidas o que eventualmente conduz a velocidades superiores de deslocamento do conjunto flutuador/êmbolo. Consequentemente prevê-se um aumento da produção e eficiência global.

##### 4.3.4.1 Área da base superior

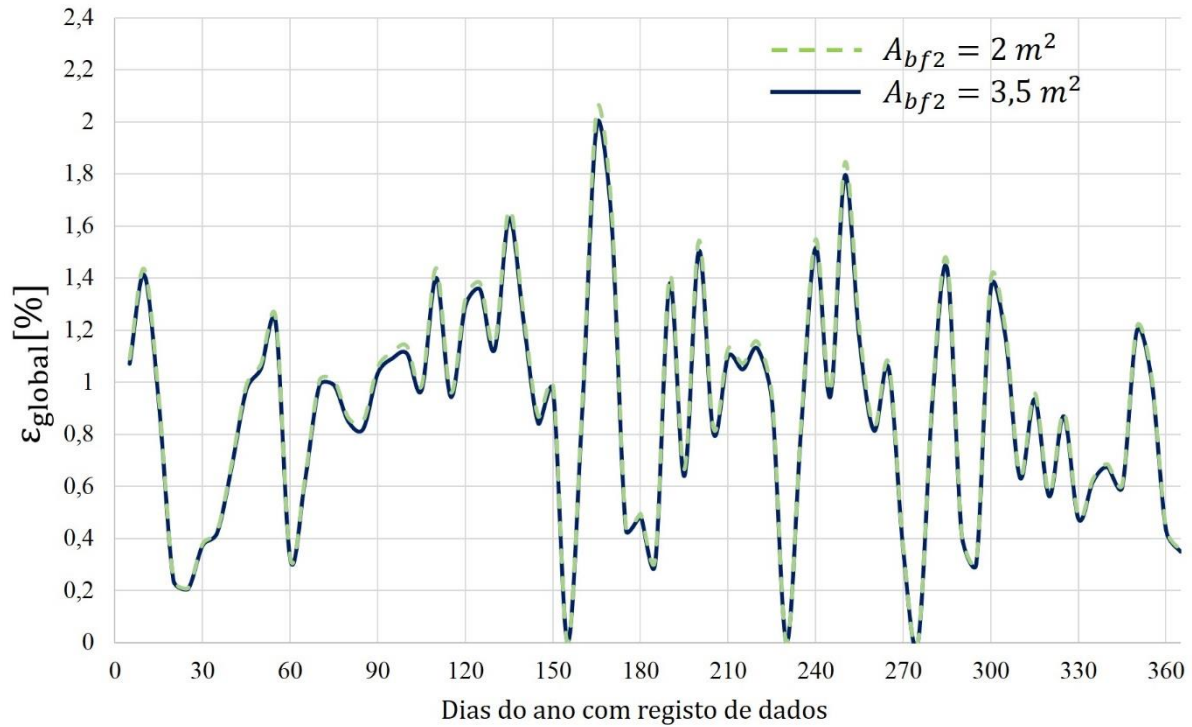
Devido à espessura da câmara-de-ar,  $A_{bf2}$  não pode ser muito reduzido, pois tornaria a parede do cilindro demasiado estreita, comprometendo a estabilidade da estrutura. Optou-se por comparar  $A_{bf2} = 2\text{ m}^2$  com  $A_{bf2} = 3,5\text{ m}^2$ . Em concordância remodelou-se a forma da câmara de ar, tal como indicado na Figura 4.11.



**Figura 4.11** Modelação da forma do flutuador e da câmara-de-ar em relação à área da base superior



**Figura 4.12** Curvas da potência elétrica para diferentes áreas da base superior (ano 2009)



**Figura 4.13** Curvas da eficiência global para diferentes áreas da base superior (2009)

Os resultados indicam que a área da base superior não tem um impacto relevante no desempenho global do protótipo. Não obstante, conclui-se que a minimização deste parâmetro leva a um pequeno aumento da eficiência como consequência de uma diminuição ligeira do diâmetro do topo do flutuador, que determina qual a largura de onda aproveitada pelo sistema. Assim, de maneira a maximizar o desempenho da estrutura final, aplica-se a área  $A_{bf2}$  mais pequena possível.

#### 4.3.4.2 Raio do êmbolo

Anteriormente constatou-se que a relação entre a área da base superior,  $A_{bf2}$ , e o raio do êmbolo,  $R_{emb}$ , depende da largura dessa mesma base ( $l_{bf2}$ ). Supondo que não se irá alterar a espessura da parede da câmara-de-ar, o valor mínimo de  $A_{bf2}$  será sempre dado para a mesma largura da base, aproximadamente 300 mm. Assim:

$$\begin{aligned}
 A_{bf2,min} &= \pi \left[ (R_{emb} + l_{bf2})^2 - R_{emb}^2 \right] \\
 \Leftrightarrow A_{bf2,min} &= \pi \left[ (R_{emb}^2 + 2l_{bf2}R_{emb} + l_{bf2}^2) - R_{emb}^2 \right] \\
 \Leftrightarrow A_{bf2,min} &= \pi (l_{bf2}^2 + 2l_{bf2}R_{emb})
 \end{aligned} \tag{4.42}$$

Compararam-se os resultados numéricos dos êmbolos com  $R_{emb} = 0,8 \text{ m}$ ,  $1 \text{ m}$  e  $1,2 \text{ m}$ .

Verifica-se que o maior êmbolo apresentou o pior desempenho (Figura B.3 e Figura B.4), tanto na produção elétrica como na eficiência global, o que sugere que as forças opostas ao movimento útil se tornam demasiado acentuadas quando se aumenta  $R_{emb}$ . Para o menor raio obteve-se uma produção anual de 23,93 MWh à potência média de 2,73 kW. Esta configuração apresentou um fator de capacidade médio anual de 0,31 e uma eficiência global média igual à do êmbolo de raio 1 m (0,9 %).

O êmbolo mais pequeno leva a fluxos de ar mais reduzidos (e potência elétrica mais baixa), independentemente das características da onda. Porém, analisando a variação da eficiência global sublinha-se que existem momentos em que o êmbolo mais pequeno opera mais eficientemente: isto acontece para ondas com amplitude reduzida, mas período extenso. Este aumento associa-se ao facto de



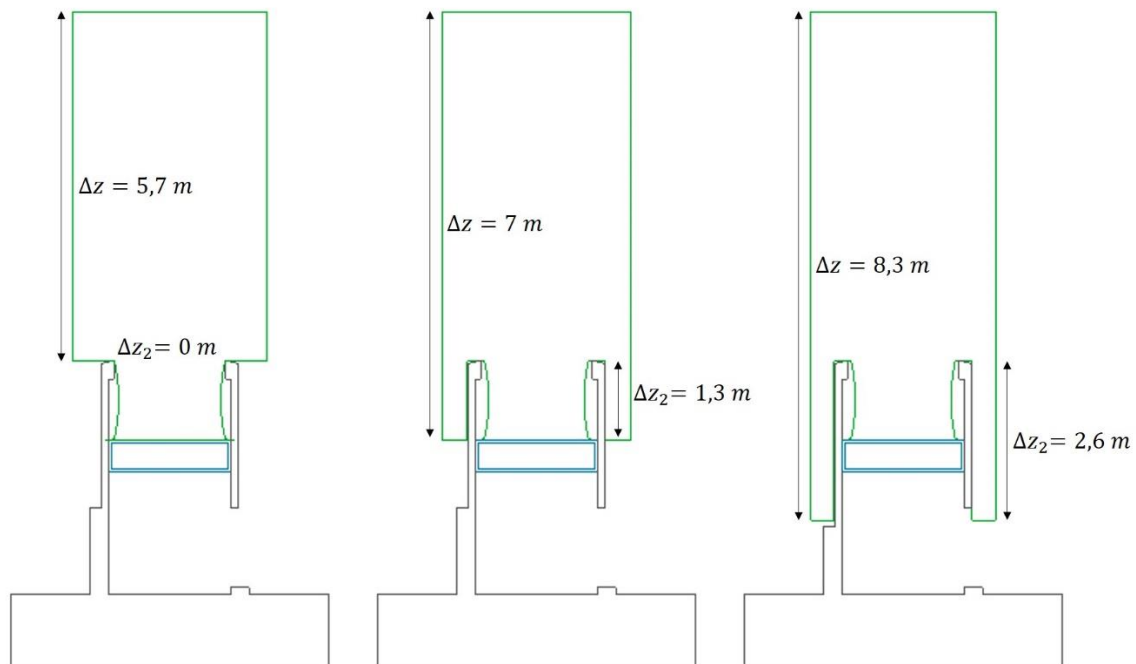
o flutuador para o menor êmbolo ter uma área de topo mais pequena do que do flutuador com o êmbolo de 1 m de raio, logo a largura de onda aproveitada também é ligeiramente menor, o que tende a aumentar a eficiência global. Apesar disso, essa particularidade não afeta a eficiência global média anual e, como tal, continua-se a usar o êmbolo com  $R_{emb} = 1\text{ m}$  para este protótipo.

#### 4.3.4.3 Altura do flutuador

Tal como proposto anteriormente, de maneira a não alterar o  $Dim$  do protótipo, a variação de  $\Delta z$  será exclusivamente feita elevando ou baixando a base inferior, ou seja, variando a distância entre a base inferior e superior,  $\Delta z_2$  (Figura 4.14).

No primeiro caso prevê-se que o diferencial de pressões entre o topo e a base do flutuador irá baixar, o que leva a uma impulsão mais reduzida. Consequentemente a área do topo do flutuador poderá também ficar mais pequena pois não é necessária tanta força do peso da água para conseguir baixar a componente móvel: uma área de topo mais reduzida deverá ser acompanhada por um aumento da eficiência global no caso de a potência elétrica média não atenuar. Caso contrário, se a base inferior for deslocada para baixo, dever-se-ia verificar o oposto: a área do topo do flutuador torna-se maior e a eficiência global do processo de conversão de energia diminui.

No caso em que a base inferior fica ao mesmo nível da base superior, a concavidade deixa de existir e, naturalmente, o coeficiente de arrasto do movimento descendente deve sofrer uma ponderação de maneira a reduzir o arrasto. Para esta situação escolheu-se o mesmo coeficiente de arrasto do movimento ascendente,  $C_{d,DOWN} = 0,8$ .



**Figura 4.14** Diversas alturas de flutuador testadas

Através da modelação conjunta do flutuador em Matlab e AutoCAD verificou-se que, ao contrário das expectativas, a área do topo do flutuador diminui quando se eleva a base inferior. Isto acontece uma vez que não se alterou a posição máxima do topo ( $d_{flutMAX}$ ) e uma redução de  $\Delta z$  se traduz numa menor pressão aplicada em  $A_{bf}$  e para compensar esta redução a área da base aumenta e assim também  $A_{tf}$ . Analisando a Figura B.5 e a Figura B.6, não se observa uma alteração relevante na potência média

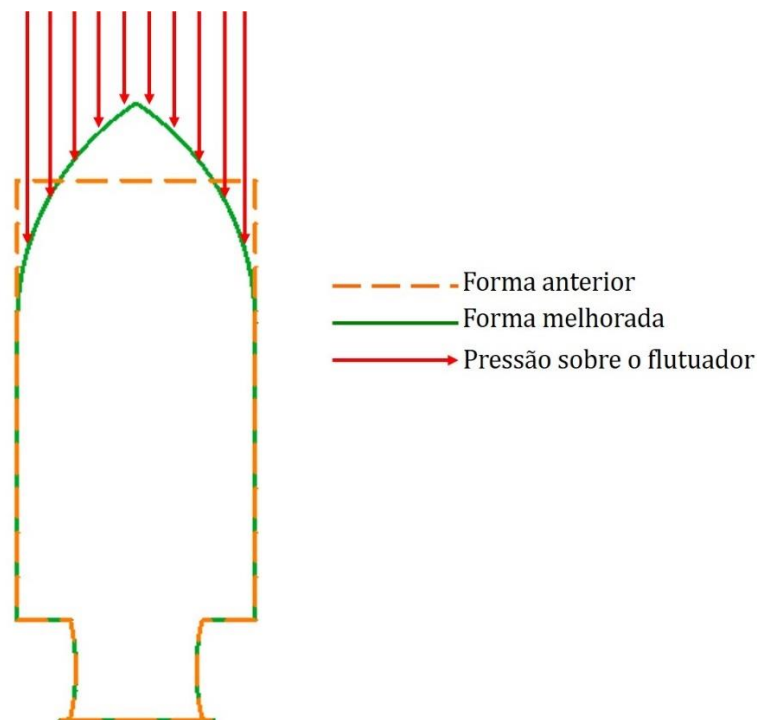
produzida, mas uma ligeira variação na eficiência global, sendo esta última um pouco maior para o flutuador com  $\Delta z = 8,3 \text{ m}$ .

Como em termos médios anuais as diferenças não são significativas escolheu-se o flutuador mais pequeno poupando custos de material. O novo flutuador permitirá construir uma câmara-de-ar com parede mais espessa.

#### 4.3.4.4 Coeficiente de arrasto

Atribuindo um perfil arredondado ao topo, o movimento ascendente será facilitado através da redução do coeficiente de arrasto. Assumiu-se que a pressão exercida por cima da superfície curva do flutuador é equivalente à pressão exercida sobre o topo do flutuador com a forma anterior se a linha do topo se encontrar aproximadamente centrada na curvatura da forma melhorada (Figura 4.15). Deste modo supõe-se que o cálculo da força sobre o flutuador se procede da mesma maneira, mantendo o mesmo  $\Delta z$ . O coeficiente de arrasto para o movimento de subida do conjunto móvel foi aproximado ao de um projétil G1 para velocidades reduzidas <sup>[36]</sup>:  $C_{d,UP} = 0,25$ .

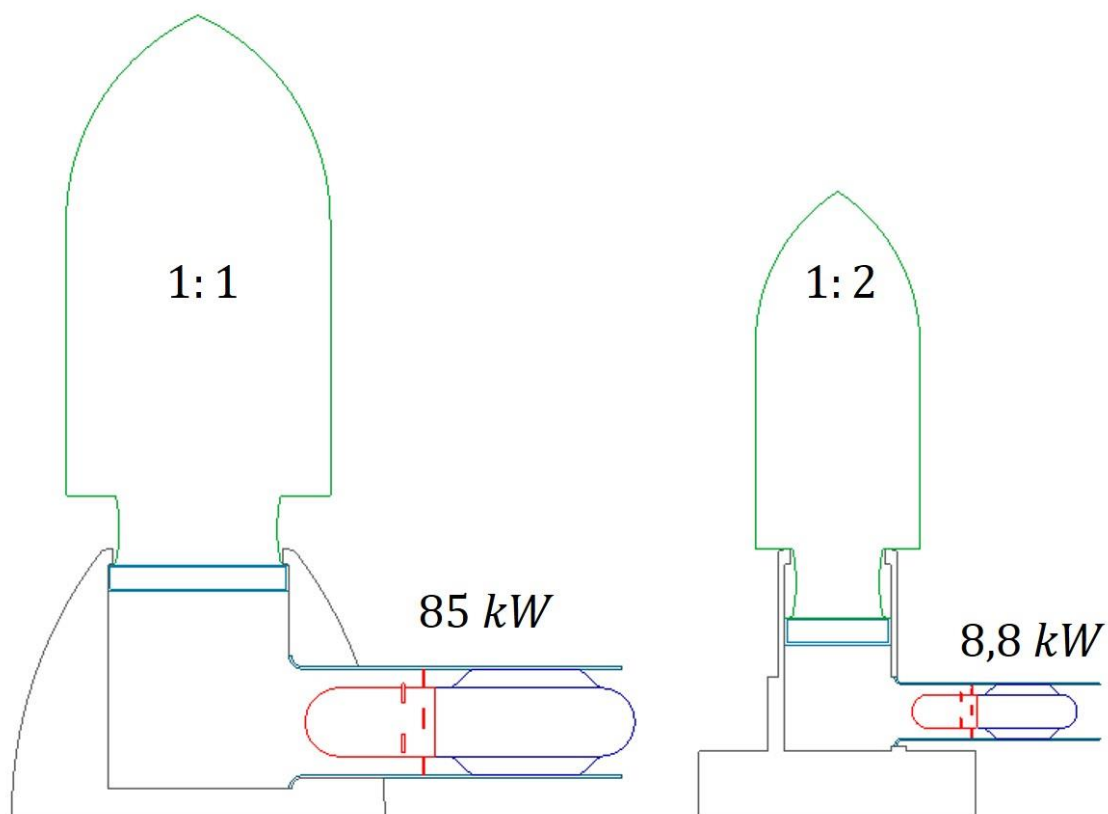
Verifica-se que nos meses de maior amplitude de ondulação, a variação da forma do flutuador não produziu um impacto significativo na potência elétrica nem na eficiência global do processo de conversão (Figura B.7 e Figura B.8). No entanto, para o período que abrange as ondas de menor altura (aproximadamente entre o dia 120 e o dia 300) a forma melhorada permitiu uma maior produção de energia e consequentemente, um acréscimo no aproveitamento da energia das ondas.



**Figura 4.15** Perfil lateral da forma melhorada e da forma anterior do flutuador

O modelo na sua forma final otimizada produz à potência média anual de  $3,29 \text{ kW}$  totalizando  $28,78 \text{ MWh}$  no final de 2009. Para este ano apresenta um fator de capacidade médio anual de 0,37 e converte, em média, 0,9 % da energia das ondas em energia elétrica. De um modo geral, os parâmetros iniciais já se apresentavam como soluções próximas do melhor desempenho sendo a diferença pouco significativa face ao modelo de parâmetros melhorados.

Recolhendo as informações da análise numérica para a variação dos diferentes parâmetros, resumem-se as características importantes do protótipo, relevantes para o algoritmo e a modelação da forma do flutuador, na Tabela B.1. Com base nas melhorias anteriores pretendeu-se, seguidamente, dimensionar um modelo com uma máquina elétrica maior, aplicando o mesmo conceito (Figura 4.16).



**Figura 4.16** Modelo à escala 1:1 e modelo à escala 1:2



## 4.4 Modelo de grande escala

### 4.4.1 Fase de redimensionamento

Pela equação 4.37, a potência mecânica máxima (e, por extensão, a potência elétrica máxima) que é possível obter com a turbina é proporcional ao cubo da velocidade máxima de rotação e à quinta potência do raio do rotor. Assim sendo, uma variação deste último parâmetro deverá causar um impacto significativo na produção. Optou-se por uma turbina com o dobro do diâmetro ( $D_t = 2\text{ m}$ ), por essa razão, o modelo anterior foi classificado como modelo à escala 1:2 relativamente ao sistema dimensionado nesta secção.

Através de análises numéricas como as que foram efetuadas para o modelo anterior averiguou-se qual o raio do êmbolo e as dimensões do flutuador, de forma a que o sistema opere de forma otimizada. Relativamente ao êmbolo, determinou-se  $R_{\text{emb}} = 1,7\text{ m}$ . Já para o flutuador, uma vez que este ficaria muito largo para  $\Delta z = 5,7\text{ m}$  aumentou-se esta grandeza para  $\Delta z = 7,7\text{ m}$ . De maneira a não interferir antecipadamente com o  $Dim$ , a variação obrigou ao deslocamento do modelo para a profundidade  $d = 22\text{ m}$  e, de igual forma, a elevação da posição máxima e mínima do topo do flutuador em 2 metros, ou seja,  $d_{\text{flutMAX}} = 14\text{ m}$  e  $d_{\text{flutMIN}} = 13\text{ m}$ . Uma vez que o perímetro do êmbolo foi expandido, as áreas dos anéis estabilizadores e do anel de vedação aumentaram. Inclusivamente, com a passagem do modelo para uma profundidade acrescida, a pressão de contacto também teve que ser sobredimensionada para  $P_{\text{max}} = 350\text{ kPa}$ . A força de contacto do anel de vedação fica:

$$F_{c,av} = P_{\text{max}} A_{c,av} = P_{\text{max}} \times 0.005 \times 2\pi R_{\text{emb}} = 18\,682,5\text{ N} \quad (4.43)$$

O redimensionamento da força de contacto permite definir um novo  $Dim$  mínimo pela equação 4.16. Assim, a nova dimensão característica do modelo de escala 1:1 fica  $Dim = 0,46$  de onde vem:

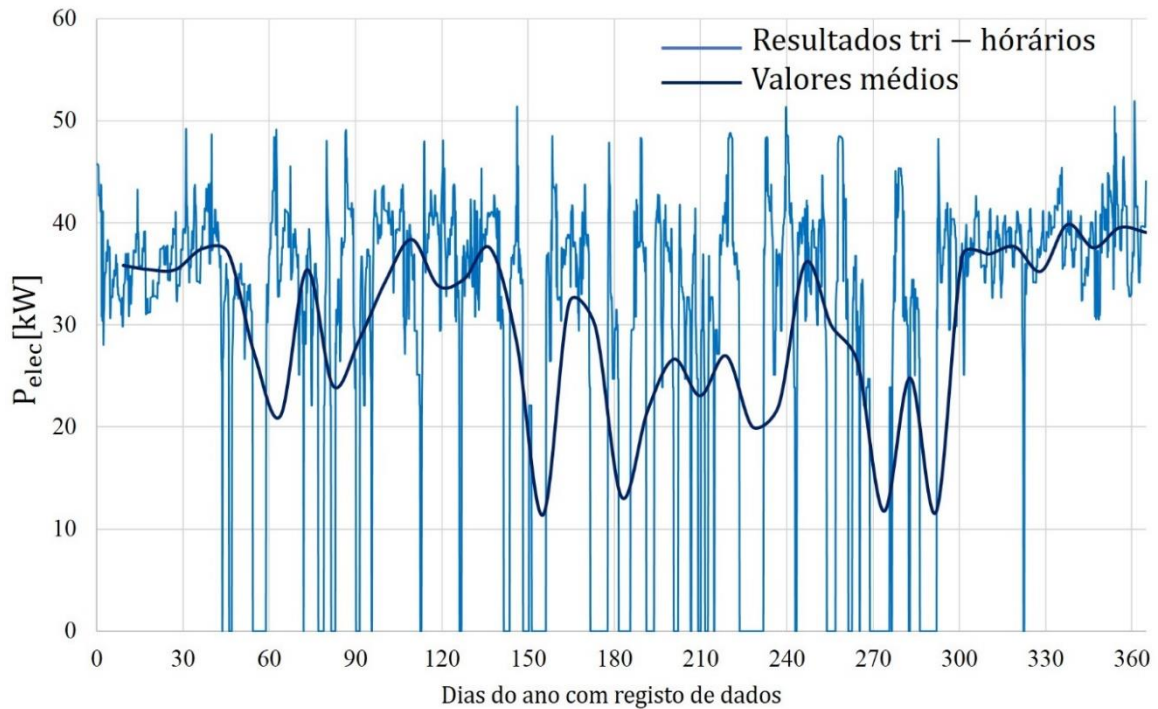
$$\begin{aligned} NOS - NOI - (d_{\text{flutMAX}} - d_{\text{flutMIN}}) &= 0,46 \\ \Leftrightarrow NOS - NOI &= 1,46 \end{aligned} \quad (4.44)$$

Centrando o nível médio ( $d$ ) entre os níveis de operação do modelo obtém-se  $NOS = 22,73\text{ m}$  e  $NOI = 21,27\text{ m}$ , o que se traduz num aumento do recurso explorado, sendo possível operar para ondas com altura igual ou superior a  $1,5\text{ m}$ .

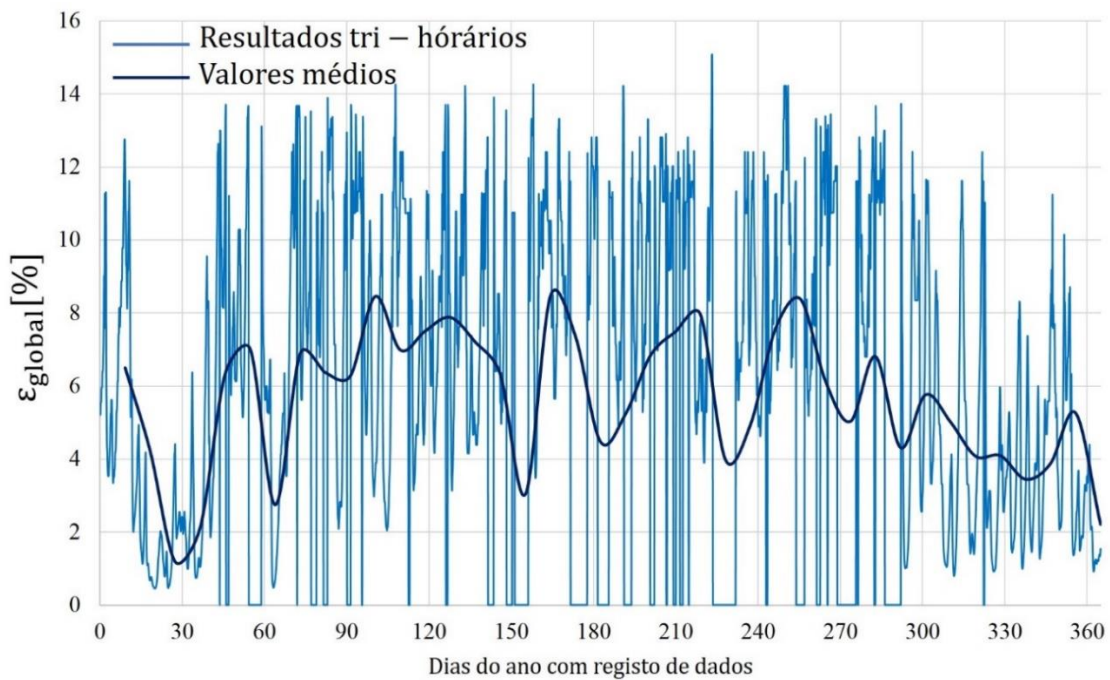
Testou-se o modelo para as novas características concluindo que a velocidade de rotação da turbina não tende a ultrapassar as  $1200\text{ rpm}$ . Por esta razão escolheu-se aplicar um gerador com 6 polos e velocidade nominal de  $1000\text{ rpm}$ . Com base nas equações 4.37 e 4.38 calcula-se a potência elétrica instalada para o modelo à escala grande:  $P_{\text{nom}} = 85\text{ kW}$  e  $\eta_G = 86\%$ . As características estruturais do modelo à escala maior encontram-se resumidas no Apêndice B, Tabela B.2.

#### 4.4.2 Produção

Com o modelo à escala grande dimensionado, procedesse com a análise numérica da produção elétrica e do desempenho do sistema. Na Figura 4.17 e Figura 4.18, respetivamente, a estimativa para a variação anual da potência elétrica e da eficiência global para o modelo no ano 2009. No ano 2009 a potência média anual foi determinada em  $29,88 \text{ kW}$  com  $FC = 0,35$ , produzindo  $261,8 \text{ MWh}$ . Das 8760 horas de registos o modelo produziu energia durante 7164 horas. A eficiência global anual foi de  $5,6 \%$ .



**Figura 4.17** Curva da potência elétrica média tri-horária para o modelo à escala 1:1 (ano 2009)



**Figura 4.18** Curva da eficiência global média tri-horária para o modelo à escala 1:1 (ano 2009)

Para obter uma noção da variação sazonal interanual da produção do modelo tabelaram-se os valores mensais interanuais da potência elétrica, energia produzida, fator de capacidade e eficiência global, para os valores médios interanuais do período e altura da ondulação (ver Tabela A.1 e Tabela A.2).

Na Tabela 4.2 verifica-se a variação típica da energia produzida e do fator de capacidade, que são mais acentuados nos meses de inverno quando as ondas são altas e são mais reduzidos para a ondulação fraca dos meses de verão.

**Tabela 4.2** Valores mensais da potência média, energia produzida, fator de capacidade e eficiência global para a altura e período de ondulação mensal interanual

	$H(m)$	$T(s)$	Potência média (kW)	Energia (MWh)	$FC$	Eficiência Global
<b>Janeiro</b>	3,2	12,0	39,0	29,02	0,46	4,2%
<b>Fevereiro</b>	3,1	12,0	38,4	25,80	0,45	4,4%
<b>Março</b>	2,7	11,0	39,2	29,16	0,46	5,9%
<b>Abril</b>	2,3	10,2	40,5	29,16	0,48	8,4%
<b>Maió</b>	2,0	9,2	29,8	22,17	0,35	8,1%
<b>Junho</b>	1,7	8,4	30,9	22,25	0,36	11,7%
<b>Julho</b>	1,7	8,2	31,1	23,14	0,37	11,7%
<b>Agosto</b>	1,8	8,3	31,8	23,66	0,37	10,7%
<b>Setembro</b>	1,9	9,8	38,3	27,58	0,45	11,6%
<b>Outubro</b>	2,4	10,6	39,4	29,31	0,46	7,5%
<b>Novembro</b>	2,8	11,1	40,5	29,16	0,48	5,6%
<b>Dezembro</b>	3,0	11,9	39,1	29,09	0,46	4,7%

Já a eficiência global do processo de conversão tende a ser maior entre abril e outubro pois as ondas apresentam uma altura abaixo da média e transportam menos energia: como o modelo atinge, em geral, a potência máxima após o êmbolo entrar em deslocamento o aproveitamento é mais eficiente nestas alturas do ano. Observa-se também que os valores máximos anuais de produção foram iguais e obtidos em dois meses nos quais a altura e período médio diferem: abril e novembro. Isto sugere que, para uma dada altura de onda, existe um respetivo valor do período, ou seja, um período ótimo ( $T_{opt}$ ), para o qual o aproveitamento por parte do modelo resulta num output máximo possível.

A Tabela 4.3 representa os valores de  $T_{opt}$ , obtidos pela observação dos valores mínimos possíveis de  $T$  para os dados do *windguru* para uma determinada altura de onda. Apresenta-se também a respetiva potência elétrica média, eficiência global e fator de capacidade.

O modelo tende a produzir o máximo para uma determinada altura de onda, quando o período é mínimo. Os resultados apresentados dizem apenas respeito a valores mínimos encontrados, o que não elimina a hipótese de haver períodos ainda mais reduzidos que tornem o output energético superior. Naturalmente, registam-se com menor frequência ondas de grandes dimensões e, como tal, é mais provável o modelo operar de forma otimizada para ondas com amplitude média.

**Tabela 4.3** Potência média, eficiência global e fator de capacidade para ondas com diferentes amplitudes e o respetivo período ótimo

$H$	$T_{opt}(s)$	$\lambda(m)$	$H/\lambda$	Potência média (kW)	Eficiência Global	$FC$
1,5	10,3	151,3	0,010	26,0	12,6%	0,31
2	4,0	58,8	0,034	46,1	12,6%	0,54
2,5	6,0	88,1	0,028	41,7	7,3%	0,49
3	6,5	95,5	0,031	52,9	6,4%	0,62
3,5	7,0	102,8	0,034	51,7	4,6%	0,61
4	8,5	124,9	0,032	47,6	3,2%	0,56
4,5	9,0	132,2	0,034	46,4	2,5%	0,55
5	10,0	146,9	0,034	44,0	1,9%	0,52
5,5	10,5	154,3	0,036	42,9	1,5%	0,50
6	11,0	161,6	0,037	41,9	1,3%	0,49

Em geral, o sistema poderá retirar o máximo proveito de uma onda quando  $H/\lambda \approx 0,03$ . A onda com 1,5 m de altura constitui a exceção à regra pois as suas características encontram-se muito perto do limite de funcionamento do modelo, que produz energia para ondas com  $H > 1,45$  m. Para ondas tão pequenas o êmbolo parte do seu estado de repouso a uma velocidade mais reduzida do que para ondas maiores e, consequentemente, a energia máxima produzida é significativamente inferior. Já para ondas grandes, um período menor resulta numa subida e descida mais rápida da coluna de água o que leva o êmbolo a subir e a descer com maior velocidade.

Face a esta conclusão, é possível inferir que um ano de ondulação fraca não significa imperativamente uma produção mais baixa. De facto, o ano de 2009 (261,8 MWh), com a maior ondulação anual média registada entre 2004 e 2012, apresenta uma produção substancialmente mais reduzida face ao total energético que seria obtido para as condições médias mensais interanuais de período e altura desse mesmo espaço de tempo (319,5 MWh).

## 4.5 Discussão de resultados

O modelo deste capítulo foi desenvolvido com o intuito de testar um novo conceito e procurar solucionar problemas de outros conversores da energia das ondas com base nos conhecimentos adquiridos pela revisão do estado da arte e de conceitos teóricos relativos à dinâmica das ondas. Para tal, partiu-se de um conjunto de pressupostos e aproximações que distanciam o modelo teórico final de um modelo físico a operar em condições reais.

### **Exclusão das forças hidrodinâmicas horizontais**

Em regime de águas pouco profundas, a velocidade horizontal das partículas de água começa a ser mais notável, passando de uma trajetória circular, típica do deslocamento de uma onda em águas profundas, para uma trajetória elíptica. Consequentemente, a pressão dinâmica e o arrasto exercidos nas laterais do flutuador também se presenceiam mais. No entanto, uma vez que o conjunto móvel desce e sobe com velocidade tal que atinge a posição mais baixa ou alta na ordem do segundo, as forças laterais são exercidas durante pouco tempo enquanto o flutuador se encontra em deslocamento.

### **Pressão de estanqueidade do êmbolo**

Para que a água do mar não atravesse os anéis do êmbolo considerou-se uma pressão de contacto mínima, para o anel de vedação, à qual o sistema ficará estanque. Esta pressão foi designada como a pressão teórica máxima que se faz sentir imediatamente por cima do êmbolo. Nomeadamente, a pressão hidrostática causada pela maior onda registada na zona de implementação, quando o êmbolo se encontra na sua posição mais baixa. Se, numa situação real, a pressão de estanqueidade se revelar mais baixa do que aquela que foi aplicada ao êmbolo do modelo teórico, então as forças de contacto e de atrito poderão ser redimensionadas para valores inferiores. Consequentemente o conjunto móvel obtém uma mobilidade facilitada o que trará benefícios ao desempenho global do modelo. Esta premissa é corroborada pela definição da dimensão característica do protótipo,  $Dim$  (ver pág. 36, Equação 4.14).

### **Ondas lineares**

As equações usadas para a velocidade das ondas e para a posição da superfície da água em regime de ondas a deslocarem-se em águas pouco profundas só são válidas se forem consideradas ondas lineares (ver pp. 4-6). No entanto, estas aproximações são mais precisas para ondas em águas profundas e à medida que as ondas se deslocam em águas de menor profundidade a dissipação energética torna-se mais evidente comprometendo a definição de onda linear e as equações envolvidas. A forma do perfil lateral da onda também poderá ter impacto no desempenho da produção do modelo. As teorias aplicadas assumem uma forma sinusoidal, porém, na realidade, as ondas apresentam um perfil semelhante a um trocoide invertido.

### **Coluna de água por cima do flutuador aproximada a um cilindro**

Para simplificar o cálculo da pressão total por cima do flutuador aproximou-se a coluna de água sobre esta estrutura a um cilindro cuja área do topo e da base corresponde à área do topo do flutuador,  $A_{tf}$ , e cuja altura é variável em cada instante da análise numérica. Naturalmente, esta aproximação é tanto mais válida quanto mais pequena for  $A_{tf}$  e quanto menor for o declive da onda.

### **Aceleração constante do êmbolo num determinado intervalo de tempo**

De maneira a determinar as soluções para a força resultante foi necessário considerar uma aceleração constante num determinado intervalo de iteração  $\Delta t$ . A validade desta aproximação é maior para intervalos iterativos menores, determinando-se que  $\Delta t$  bastava ser 0,01 s.

### **Ciclos de iteração para a velocidade de deslocamento do êmbolo**

A velocidade de deslocamento da componente móvel foi obtida para um ciclo com diversas iterações (ver Figura C.1 pág. 81). Um ciclo único diz respeito ao cálculo da velocidade e aceleração do êmbolo e do flutuador, com ponderação das forças dependentes da velocidade: força de arrasto; força devido à diferença de pressões entre o cilindro e o segmento da turbina; força devido à queda de pressão através da turbina. Os ciclos são repetidos até não se verificar uma variação significativa nos resultados. Assim estimou-se que se atingia o limite da precisão no cálculo da velocidade de deslocamento do flutuador e das forças dependentes desta grandeza para 10 ciclos iterativos.

### **Decréscimo Periódico da velocidade de rotação**

Numa situação real, o *DPR* pode ser menor do que o valor proposto e, nesse caso, a viabilidade técnica do modelo é posta em causa. O tempo que a turbina demora a parar, sem a influência da força pneumática, depende da conservação do momento angular e da energia de rotação adquirida. Estas, por sua vez, variam com o momento de inércia, massa do rotor e atritos no mecanismo. Uma vez que o *DPR* tem um impacto tão acentuado na performance do modelo, todas estas grandezas envolvidas são merecedoras de especial atenção quando o conceito é retomado de forma mais rigorosa.

### **Exclusão da conduta de ar**

Todas as componentes que precedem o segmento da turbina, isto é, a conduta de ar, a estrutura da troca de ar e as boias à superfície da água foram excluídas da análise numérica, supondo que a área da secção se mantém constante entre a saída/entrada do ar no plano das pás da turbina até à saída/entrada do ar à superfície da água. Deste modo não se verificam perdas de carga relevantes. Existe, naturalmente, uma variação da pressão associada à diferença de alturas entre o ar que se encontra ao nível da turbina e o ar que se encontra ao nível da superfície da água. Porém, sendo a densidade do ar muito reduzida, este diferencial foi negligenciado.

### **Nível médio constante da água**

O algoritmo para a resolução do balanço de forças considera uma profundidade média  $d$  constante e igual a 22 m. No entanto, em geral, a variação máxima observável corresponde a 1,5 metros acima ou abaixo do nível médio da água, como consequência das marés. Uma vez que o *Dim* do modelo é extremamente sensível ao tamanho da coluna de água por cima do flutuador, ao operar em condições reais a produção energética deverá variar em relação às estimativas propostas pelos ensaios numéricos. Para o modelo à escala 1:1, se o nível médio da água for  $d = 21$  m o flutuador terá mais facilidade em subir, no entanto, só baixa para ondas com altura igual ou superior a 3,5 metros. Se o nível da água for 23 m o flutuador terá facilidade em descer, mas só sobe para ondas com altura igual ou superior a 3,5 metros.

Com base nos pressupostos e aproximações anteriores, desenvolveu-se o algoritmo que permite efetuar os ensaios numéricos e a otimização gradual das características do modelo. O ano 2009 foi favorecido com um registo completo de dados de altura e período de ondulação, num espaço de três em três horas, ao longo de todo o ano para a zona de Peniche. Por essa razão escolheu-se esse mesmo ano para a análise computacional do desempenho do modelo. O ano 2012 foi usado como exemplo de um ano de fraca ondulação média, no entanto, apresenta apenas 8058 horas de dados arquivados.

O modelo assume um gerador síncrono de ímanes permanentes. Geradores síncronos apresentam eficiência elevada e constituem a fonte primária da energia elétrica comercial. Ao contrário dos geradores de indução, GS não necessitam de um enrolamento de excitação adicional na armadura pois o uso de eletroímãs ou ímanes permanentes permite a compensação de potência reativa.

Adicionalmente é possível acoplar um conversor de frequências de escala completa. Apesar de a turbina atingir velocidades de rotação próximas do valor seu máximo, para quase toda a gama de ondas admitidas pelo *Dim*, estes picos são de curta duração o que se traduz numa frequência de *output* muito flutuante. Assim, pela aplicação do conversor pretende-se melhorar a qualidade da potência elétrica produzida. Não obstante, este tipo de máquinas elétricas tende a ser muito dispendioso e os polos são tipicamente produzidos a partir de ligas ferromagnéticas contendo o metal raro neodímio, um aspeto de pouca sustentabilidade ecológica.

As simulações numéricas para o modelo à escala 1:2 envolveram um gerador elétrico com 8,8 kW de potência nominal. Com os parâmetros otimizados o sistema electroprodutor apresentou um fator de capacidade anual médio de 0,36 totalizando, em média, 27 MWh de energia elétrica por ano e convertendo a energia das ondas em eletricidade com uma eficiência anual de 0,9 %.

O modelo à escala 1:1 foi simulado com um gerador de 85 kW. Os ensaios numéricos resultaram num fator de capacidade anual médio de 0,34, o que leva o modelo a produzir anualmente cerca de 244 MWh de energia elétrica à eficiência global média de 5,6 %.

No primeiro caso o *Dim* utilizado foi 0,65 m e no segundo foi possível diminuir o parâmetro para 0,46 m. Esta variação teve um impacto na gama de ondas aproveitáveis e no número médio de horas anuais de operação: o modelo à escala 1:2 opera durante cerca de 70 % do tempo enquanto que o seu homónimo de maiores dimensões produz aproximadamente ao longo de 79 % do ano. Resumidamente, duplicar a escala do modelo resultou numa produção elétrica 9 vezes superior e um processo de conversão 6 vezes mais eficiente, registando-se um ligeiro decréscimo no fator de capacidade.

De um modo geral, a eficiência global do processo de conversão da energia das ondas para este modelo é muito reduzida, verificando-se ocasionalmente valores máximos de aproximadamente 15 %. O *input* energético consiste no peso da coluna de água por cima do flutuador. Parte dessa energia é desperdiçada pelo facto de o modelo operar entre um nível de operação inferior e superior (*NOI* e *NOS*, respetivamente). Seguidamente, uma porção da energia é dissipada devido ao atrito entre o êmbolo e o cilindro. O atrito depende da força de contacto que, por sua vez, terá necessariamente que ser acentuada para garantir a estanqueidade do sistema, o que não permite dispensar as perdas mencionadas. Numa fase intermédia, a energia da onda é transformada em energia cinética do fluxo de ar, sendo importante notar que este fluido de trabalho apresenta pouca densidade energética devido à sua massa volúmica reduzida. Consequentemente, apenas uma fração acaba por ser convertida em energia mecânica pelo rotor da turbina, inclusivamente por se tratar de uma turbina Wells que, como se verificou anteriormente, apresenta uma eficiência aerodinâmica relativamente baixa (ver pág. 33). Finalmente, a energia mecânica é transformada em eletricidade através do gerador elétrico, que apresenta também a sua eficiência. A própria natureza do modelo, isto é, as características que levam à definição da sua dimensão característica *Dim*, limitam fortemente a sua eficiência e produtividade. Por um lado, não permitem ao modelo operar para qualquer valor arbitrário de altura de onda. Por outro lado, a amplitude de deslocamento do êmbolo, à qual se associa a velocidade do fluxo de ar criado, não pode ser demasiado elevada.

De entre as características do recurso explorado, a altura das ondas é a que mais tem impacto no desempenho do modelo, ditando, inclusivamente, se o êmbolo se desloca ou não. No entanto, como se verificou na Tabela 4.2 e Tabela 4.3, para uma dada altura de onda, a energia produzida e a eficiência global são maiores se o período for mínimo.

## Conclusões

De entre os conversores de energia descritos no estado da arte (Capítulo 2 pp. 11-20), os sistemas óleo-hidráulicos aparentam ser os mais promissores, devido ao conceito simples, a eficiência elevada dos motores hidráulicos e a robustez das estruturas. No caso do Wavestar destaca-se o elevado número de horas de produção, sendo capaz de operar mesmo para ondas com altura reduzida na ordem de grandeza dos centímetros. A possibilidade da recolha das alavancas em caso de condições adversas aumenta a sua longevidade apesar de se encontrar instalado à superfície da água, onde as tempestades se tornam problemáticas para a maioria dos conversores. Já o Waveroller opera ancorado ao fundo marinho, em profundidades reduzidas, poupando nos investimentos de ligação elétrica através de cabos submarinos. Vários dispositivos podem funcionar em conjunto constituindo parques electroprodutores com potencial na ordem dos MW e os tanques de lastre possibilitam uma manutenção facilitada. Ambos os conversores apresentam potencial para operar ao longo de todo o ano, produzindo energia mesmo para ondas de pequenas dimensões.

O conceito dos reservatórios comprimíveis aparenta ser promissor para aplicações de pequena escala, tal como proposto pelo DMP da M3Wave. O facto de funcionar mais eficientemente para comprimentos maiores obrigaria a uma estrutura longa em aço, de difícil manutenção e despesas elevadas em material. Os testes em laboratório permitiram concluir que os reservatórios têm capacidade de comprimir em menos de 3 segundos, o que se torna vantajoso considerando a velocidade à qual as ondas se propagam por cima do sistema. A estrutura com orifícios expandidos permitiu gerar fluxos de ar com velocidades máximas superiores a 10 m/s. Se for possível recriar situações semelhantes dentro de água, com estruturas maiores, deverá ser possível operar turbinas de ar a partir deste conceito.

O novo conceito explorado no capítulo 4 foi desenvolvido reunindo certos aspetos benéficos de outros conversores da energia das ondas: opera perto da costa reduzindo as despesas em ligações elétricas; encontra-se ancorado ao fundo marinho, contribuindo para reduzido impacto visual (à exceção da estrutura para troca de ar); encontra-se fora do alcance das características severas à superfície da água, o que permite aumentar a longevidade do sistema; o funcionamento é independente da direção e do comprimento das ondas. Embora pouco eficiente do ponto de vista global, o modelo apresentou uma resposta rápida na interação com as ondas atingindo um output próximo à potência nominal para a maioria das situações de operação, apesar de a potência produzida ostentar flutuações acentuadas. Estas poderão ser eventualmente compensadas se várias unidades do mesmo modelo operarem em série. O fator de capacidade e o número de horas de produção também constituíram fatores promissores.

De forma a comparar, com rigor, o presente modelo com os conversores abordados no estado da arte, todo o conceito deveria ser reanalisado com recorrência a ferramentas CFD de modo a estimar a validade dos pressupostos considerados. Sem validações computacionais rigorosas ou ensaios reais, terá que ser assumido que a dimensão característica  $Dim$  impõe demasiadas limitações ao modelo para que este seja considerado viável do ponto de vista técnico.

A energia das ondas constitui um recurso de alta previsibilidade e, ao contrário do vento ou da radiação solar, encontra-se sempre disponível. O facto de haver designs tão variados que permitem a sua exploração leva a crer que o método de conversão mais viável poderá nem ser apenas um, mas sim vários, dependendo das características da zona a ser explorada. Com crescentes investimentos e progresso tecnológico o mercado das renováveis oceânicas poderá tornar-se competitivo com o das fontes de energias renováveis tradicionais, num futuro próximo.





## Referências

- [1] International Energy Agency. 2017. *Hydropower*. [ONLINE]. Disponível em <https://www.iea.org>. Consultado a 5 de Fevereiro de 2017
- [2] International Energy Agency. 2017. *Wind*. [ONLINE]. Disponível em <https://www.iea.org>. Consultado a 5 de Fevereiro de 2017
- [3] MERTENS, Konrad. *Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*. 3ª Edição Fachbuch verlag Leipzig, 2015.
- [4] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. 2017. *Renewables 2017: Global Status Report*. [ONLINE]. Disponível em <http://www.ren21.net>. Consultado a 27 de Abril de 2018
- [5] OTEC NEWS. 2016. *What is OTEC*. [ONLINE]. Disponível em <http://www.otecnews.org>. Consultado a 9 de Novembro de 2016
- [6] Alternative Energy Tutorials. 2018. *Tidal Energy*. [ONLINE]. Disponível em <http://www.alternative-energy-tutorials.com>. Consultado a 4 de Maio de 2018.
- [7] Bureau of Ocean Energy Management. 2018. *Ocean Current Energy*. [ONLINE]. Disponível em <https://www.boem.gov>. Consultado a 4 de Maio de 2018.
- [8] Ministério do Mar. Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior. Ministério da economia. Ministério do Ambiente. Ministério da Defesa. WavEC. CEIIA. Instituto Superior Técnico. Galp Energia. (2016). *ENERGIA NO MAR: Roteiro para uma Estratégia Industrial das Energias Renováveis Oceânicas*. Lisboa: Ministério do Mar
- [9] WORLD ENERGY COUNCIL. 2016. *World energy resources: Marine Energy/2016*. [ONLINE]. Disponível em: <https://www.worldenergy.org> [acedido em 21 de Março de 2018]
- [10] Stormsurf. 2016. *Wave basics*. [ONLINE]. Disponível em <http://www.stormsurf.com>. Consultado a 21 de Agosto de 2017
- [11] SALMON, Rick. *Introduction to Ocean Waves*. Instituição de Oceanografia de Scripps, Universidade da Califórnia, San Diego. 2015
- [12] RIEDEL, Hans Peter; BYRNE, Anthony Paul. Random breaking waves – Horizontal seabed, Chapter 68, 1986.
- [13] CRUZ, João. *Ocean wave energy: current status and future perspectives*. 1ª Edição Springer-Verlag Berlim-Heidelberg, 2008.
- [14] WavEC Offshore Renewables. 2012. *OWC*. [ONLINE]. Disponível em: <http://www.wavec.org/>. Consultado a 9 de Fevereiro de 2017
- [15] Energia das Ondas: Pico é referência na Europa. (2011, 30 de Maio). *Expresso*. Retirado de [http://expresso.sapo.pt/economia/economina\\_energia/energia-das-ondas-pico-e-referencia-na-europa=f652192#gs.4JOcupU](http://expresso.sapo.pt/economia/economina_energia/energia-das-ondas-pico-e-referencia-na-europa=f652192#gs.4JOcupU)
- [16] International Renewable Energy Agency, IRENA. 2014. *WAVE ENERGY TECHNOLOGY BRIEF*. [ONLINE]. Disponível em: <http://www.irena.org>. Consultado a 10 de Fevereiro de 2017
- [17] Central de ondas dos Açores vai ser desmantelada 19 anos depois. (2018, 19 de Abril). *Diário de Notícias*. Retirado de <https://www.dn.pt/lusa/interior/central-de-ondas-dos-acores-vai-ser-desmantelada-19-anos-depois-9272196.html>

- [18] Pelamis Wave Power. 2017. *Pelamis Technology*. [ONLINE]. Disponível em: <https://www.pelamiswave.com>. Consultado a 10 de Fevereiro de 2017
- [19] Renewable Energy UK. 2016. *Archimedes Wave Swing Machines*. [ONLINE]. Disponível em: <http://www.reuk.co.uk>. Consultado a 9 de Novembro de 2016
- [20] AW-Energy. 2017. *WAVEROLLER*. [ONLINE]. Disponível em: <http://aw-energy.com/>. Consultado a 11 de Novembro de 2016
- [21] Wave Star Energy. 2017. *WAVESTAR*. [ONLINE]. Disponível em: <http://wavestarenergy.com/>. Consultado a 25 de Agosto de 2017
- [22] KOFOED, J.P., FRIGAARD, P., KRAMER, M. *Recent Developments of Wave Energy in Denmark*. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aalborg Dinamarca, 2006.
- [23] Carnegie Clean Energy. 2017. *What is CETO*. [ONLINE]. Disponível em: <https://www.carnegiece.com>. Consultado a 27 de Agosto de 2017
- [24] Bombora Wave Power. 2018. *mWave<sup>TM</sup>*. [ONLINE]. Disponível em: <http://www.bomborawave.com>. Consultado a 8 de Janeiro de 2018
- [25] SILVA, Raquel Sousa. Australianos querem produzir energia nas ondas de Peniche. (2016, 9 de Maio). *Jornal de Leiria*. Retirado de <https://www.jornaldeleiria.pt/noticia/australianos-querem-produzir-energia-nas-ondas-de-peniche-4224>
- [26] VIDEO: M3 Wave's DMP wave Energy converter. (2015, 14 de Agosto). *Tidal Energy Today*. Retirado de <https://tidalenergytoday.com/2015/08/14/video-m3-waves-dmp-wave-energy-converter/>
- [27] M3 Wave Energy Systems LLC. (2010). *DMP: Simple, Scalable and Submerged*. Oregon
- [28] Wave Energy Prize. 2016. TEAMS. [ONLINE]. Disponível em: <https://waveenergyprize.org>. Consultado a 23 de Maio de 2018
- [29] The Physics Factbook. *Coefficients Of Friction For Teflon*. [ONLINE]. Disponível em: <https://hypertextbook.com>. Consultado a 3 de Novembro de 2017
- [30] YANG, L.J, *Wear coeficiente equation for aluminium-based matrix composites against steel disc*, 2003.
- [31] TMS. 2017. *PTFE-Teflon*. [ONLINE]. Disponível em: <https://supplier.lv/>. Consultado a 9 de Novembro de 2017
- [32] BURRIS, David L.; SAWYER, W. Gregory. *A low and ultra-low wear rate PEEK/PTFE composite*. Elsevier, Fevereiro 2006. Disponível em [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
- [33] SHAABAN, S. *Insight analysis of biplane Wells turbine performance*. Elsevier, Março 2012. Disponível em [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [34] HSIAO, Chun-Yu; YEH, Sheng-Nian; HWANG, Jonq-Chin. Design of high performance Permanent-Magnet Synchronous Wind Generators. [www.mdpi.com](http://www.mdpi.com), Energies, 2014
- [35] Advanced Energy (ae). 2014. Report: Permanent Magnet Generator Performance Testing. [ONLINE]. Disponível em: <http://www.ftcinnovations.com/FTCReport.pdf> [acedido em 28 de Março de 2018]
- [36] Fr. Frog. 2015. Trowing lead: a short course in external ballistics. [ONLINE]. Disponível em: <http://www.trowinglead.com> [acedido em 18 de janeiro de 2018]

## Apêndice A Análise dos dados de altura e período de onda na zona de Peniche/Baleal\*

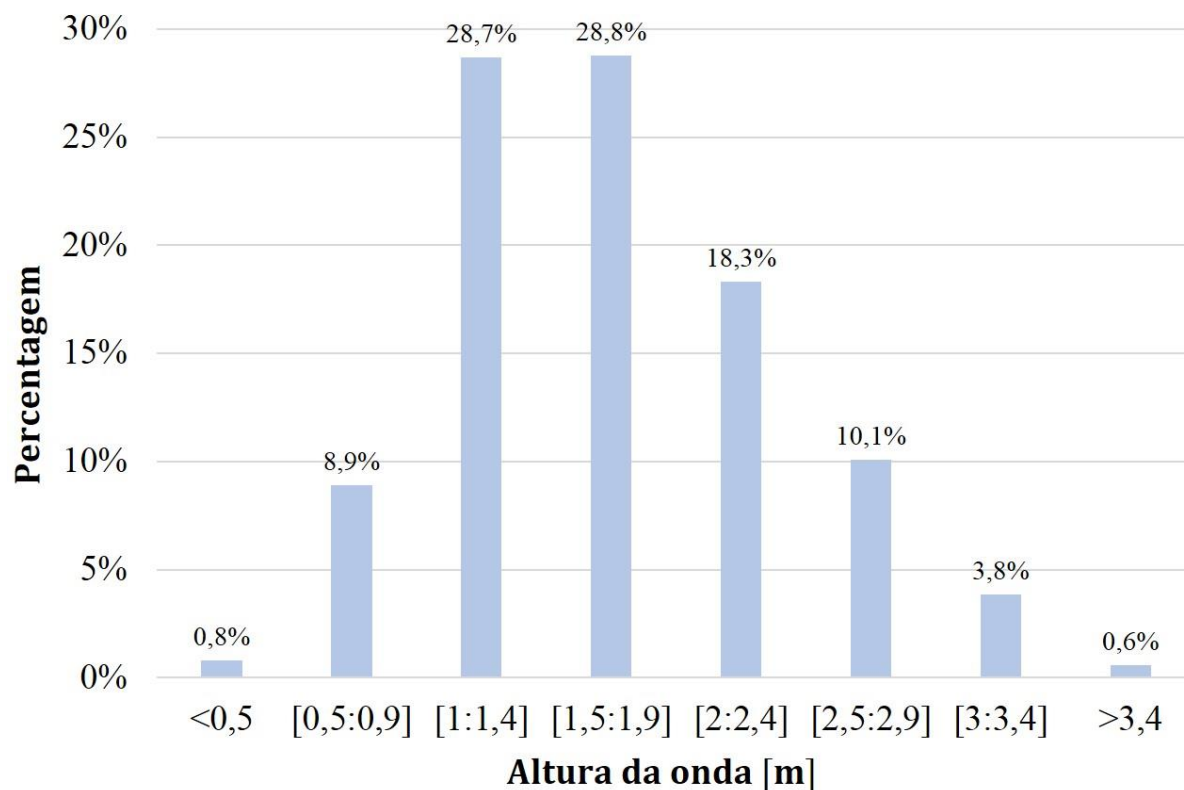
**Tabela A.1** Altura significativa mensal, altura significativa anual e média mensal interanual da ondulação na zona de Peniche/Baleal entre 2004 e 2013

ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Altura Média anual [m]
2004	2,9	2,6	2,8	2,7	1,9	1,4	1,6	1,8	1,8	2,9	1,8	3,0	2,3
2005	2,8	2,3	2,5	2,3	1,9	1,4	1,6	1,7	1,8	2,4	3,1	2,2	2,2
2006	2,8	2,9	2,8	2,2	1,9	1,5	1,5	1,9	2,1	2,6	2,8	3,1	2,4
2007	2,9	3,5	3,0	1,6	2,2	1,9	1,9	2,1	1,6	1,8	1,6	3,1	2,3
2008	3,5	2,5	3,2	2,7	1,9	1,8	1,7	2,0	1,8	2,4	2,7	3,3	2,5
2009	4,3	2,9	2,7	2,4	2,2	1,7	1,7	1,9	1,7	2,2	3,8	3,9	2,6
2010	3,4	3,7	2,6	2,0	2,1	2,3	2,1	1,9	1,8	2,7	3,2	2,9	2,5
2011	2,7	4,0	2,2	2,3	2,2	1,8	2,2	1,6	2,2	2,4	3,4	2,8	2,5
2012	2,3	1,9	2,1	2,7	1,8	1,8	1,7	1,6	2,0	2,4	3,2	3,2	2,2
2013	3,6	3,3	3,3	3,1	2,5	2,0	1,2	1,8	1,9	2,4	2,4	3,3	2,6
2014	4,2	4,6	2,6	2,0	1,8	1,5	1,7	1,5	1,7	2,4	3,4	2,6	2,5
2015	3,0	2,8	2,6	1,8	2,2	1,6	1,6	1,7	1,8	2,3	2,4	3,1	2,2
<b>Média Mensal Interanual [m]</b>	3,1	2,9	2,7	2,4	2,1	1,8	1,7	1,8	1,9	2,4	2,8	3,1	<b>2,4</b>

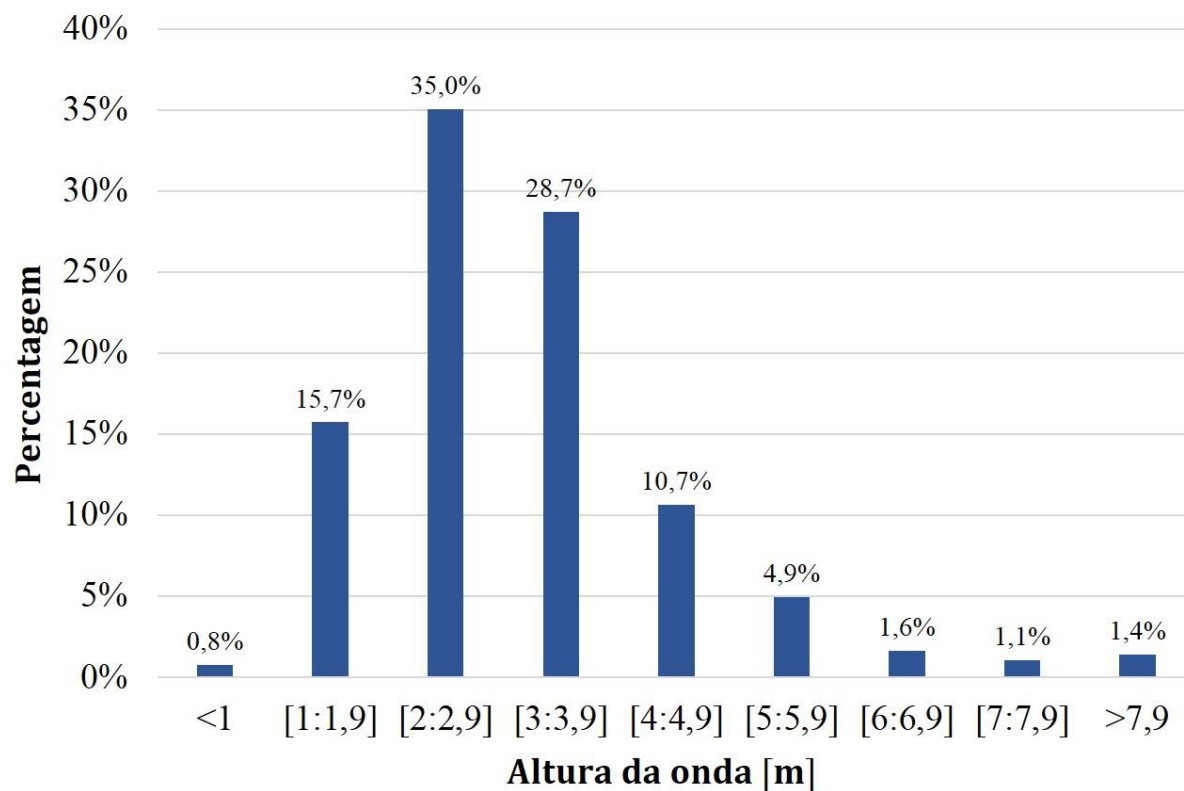
\* A análise foi feita com base em dados retirados de <https://www.windguru.cz/> que correspondem a medições diárias, de 3 em 3 horas, da altura significativa da ondulação e período médio nesse espaço de tempo.

**Tabela A.2** Período médio mensal, período médio anual e média mensal interanual da ondulação na zona de Peniche/Baleal entre 2006 e 2013

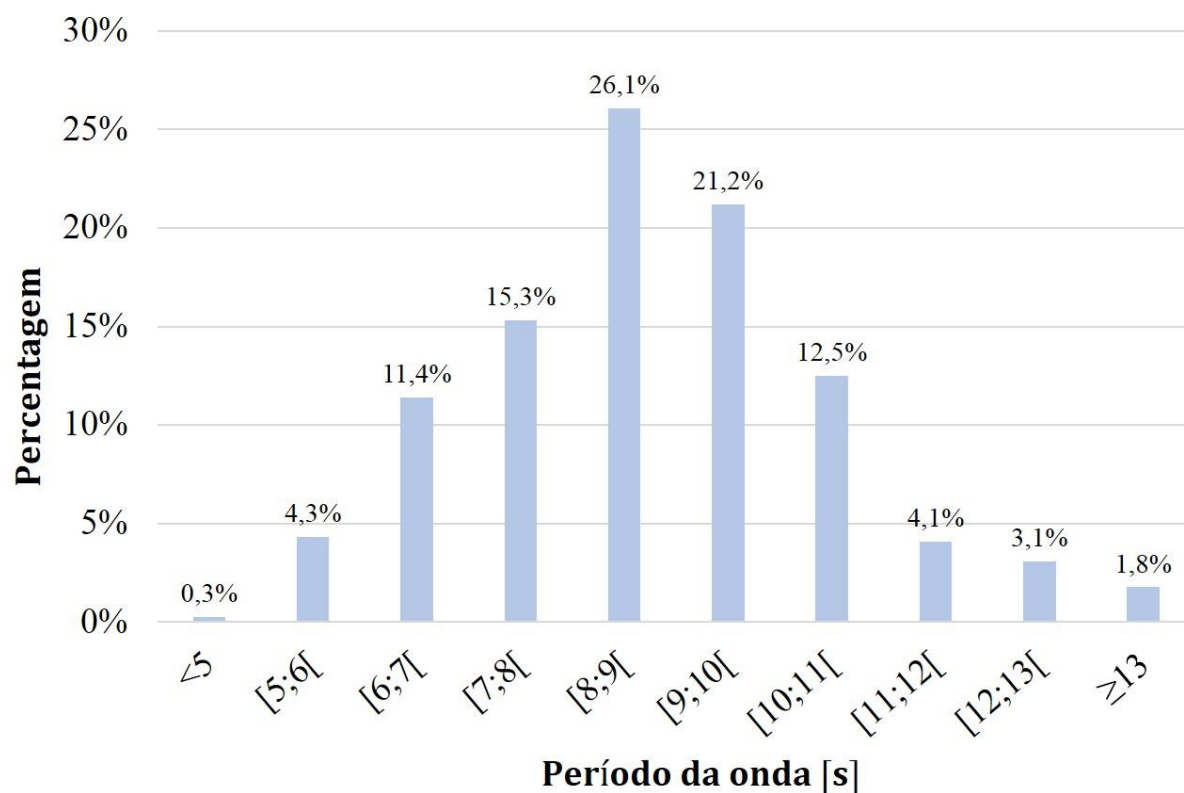
ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAIO	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	Período Médio Anual [s]
<b>2006</b>	-	11,3	11,2	9,6	9,2	7,6	8,2	7,2	10,3	9,9	11,6	11,9	9,8
<b>2007</b>	12,3	12,6	11,2	9,5	9,2	8,4	8,3	8,2	8,9	10,5	9,5	12,4	10,1
<b>2008</b>	12,4	11,9	11,4	10,4	8,6	7,8	8,6	9,0	9,8	10,5	10,0	11,7	10,2
<b>2009</b>	13,4	12,2	10,8	10,3	10,1	8,4	8,2	8,6	8,9	10,7	12,2	11,7	10,5
<b>2010</b>	10,8	12,2	10,3	10,0	8,9	9,0	8,7	7,7	10,2	10,5	10,8	10,1	9,9
<b>2011</b>	10,8	13,4	10,8	11,0	10,0	8,6	7,9	8,4	10,6	10,6	11,5	11,8	10,5
<b>2012</b>	12,0	10,1	11,6	10,1	8,6	8,7	7,5	8,7	9,5	10,5	11,3	12,1	10,0
<b>2013</b>	12,2	11,8	10,9	10,9	9,1	8,7	8,2	8,5	9,9	11,2	12,0	13,3	10,6
<b>Média Mensal Interanual [s]</b>	12,0	12,0	11,0	10,2	9,2	8,4	8,2	8,3	9,8	10,6	11,1	11,9	<b>10,2</b>



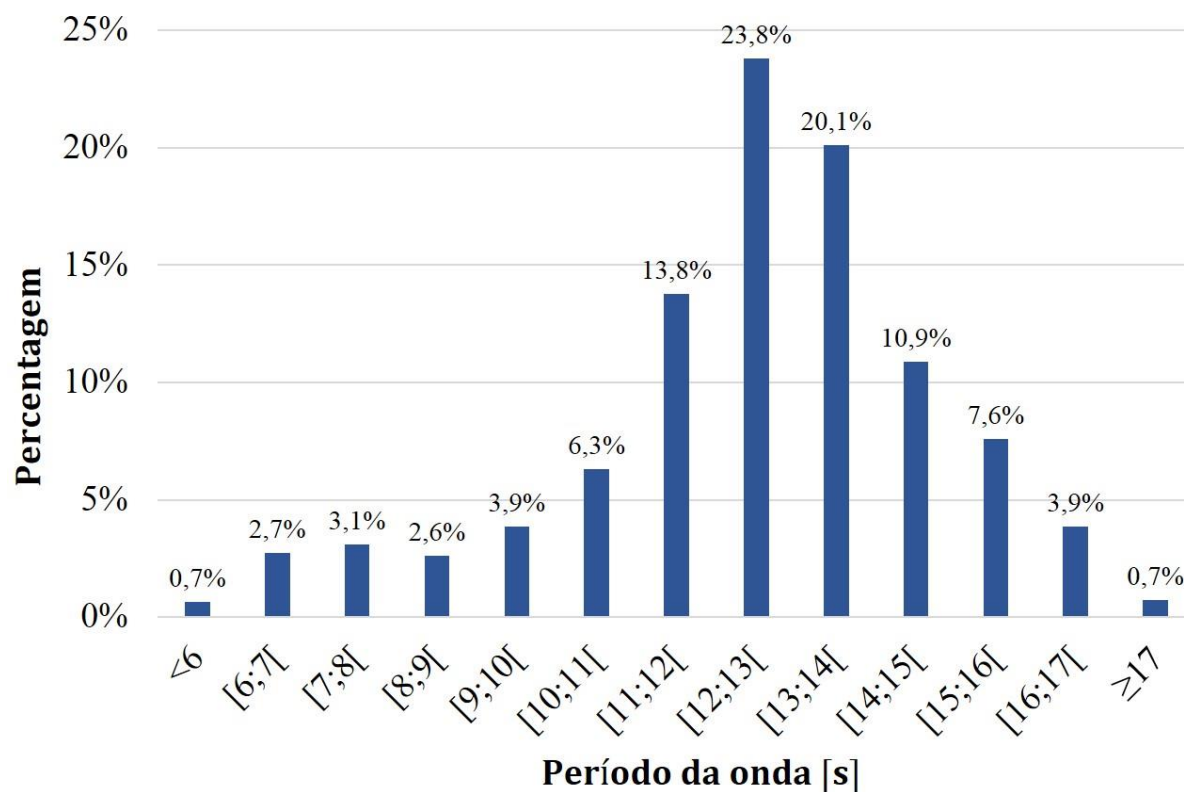
**Figura A.1** Distribuição por classes estatísticas da altura significativa das ondas na zona de Peniche/Baleal no mês de julho



**Figura A.2** Distribuição por classes estatísticas da altura significativa das ondas na zona de Peniche/Baleal no mês de janeiro

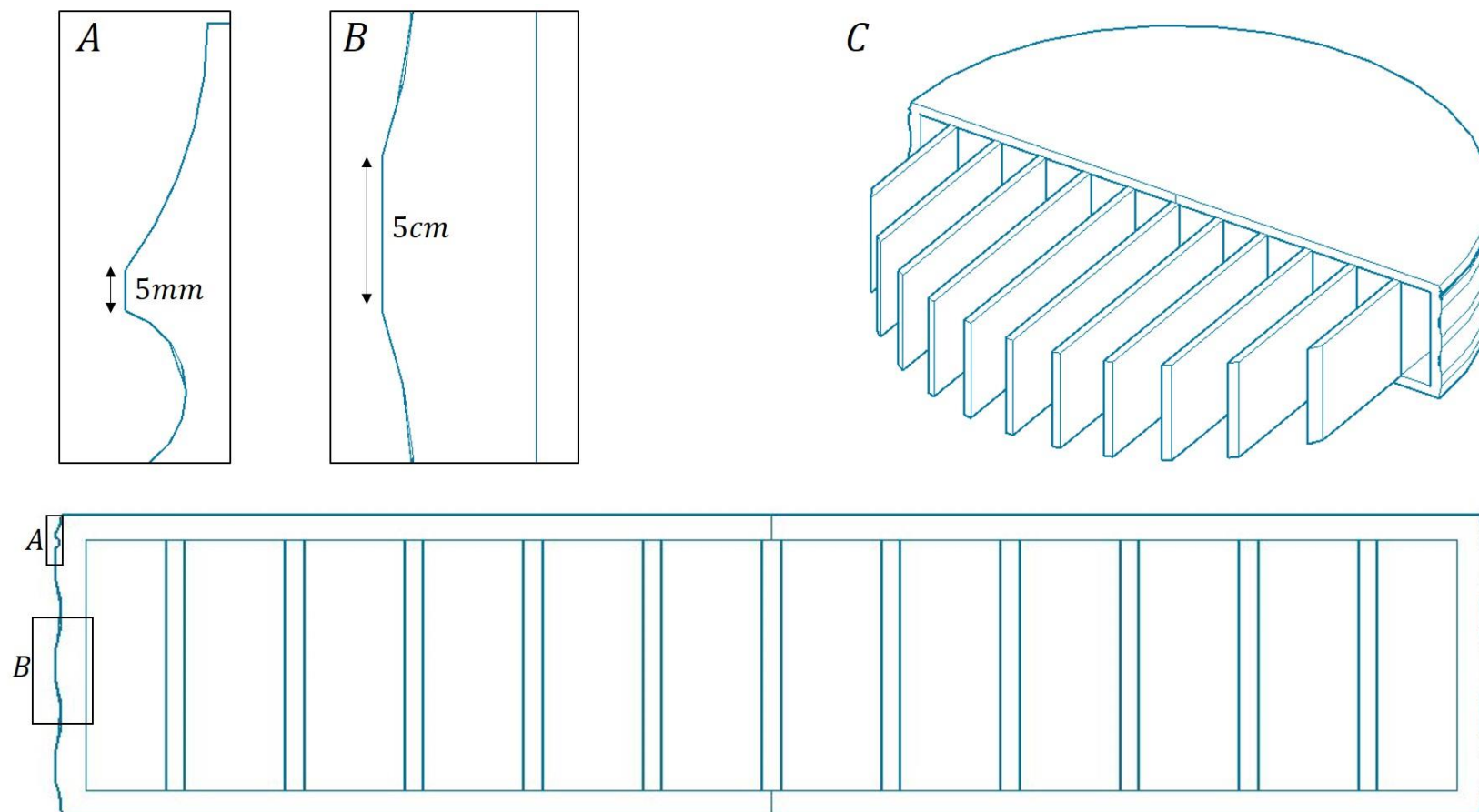


**Figura A.3** Distribuição por classes estatísticas do período de onda na zona de Peniche/Baleal em julho



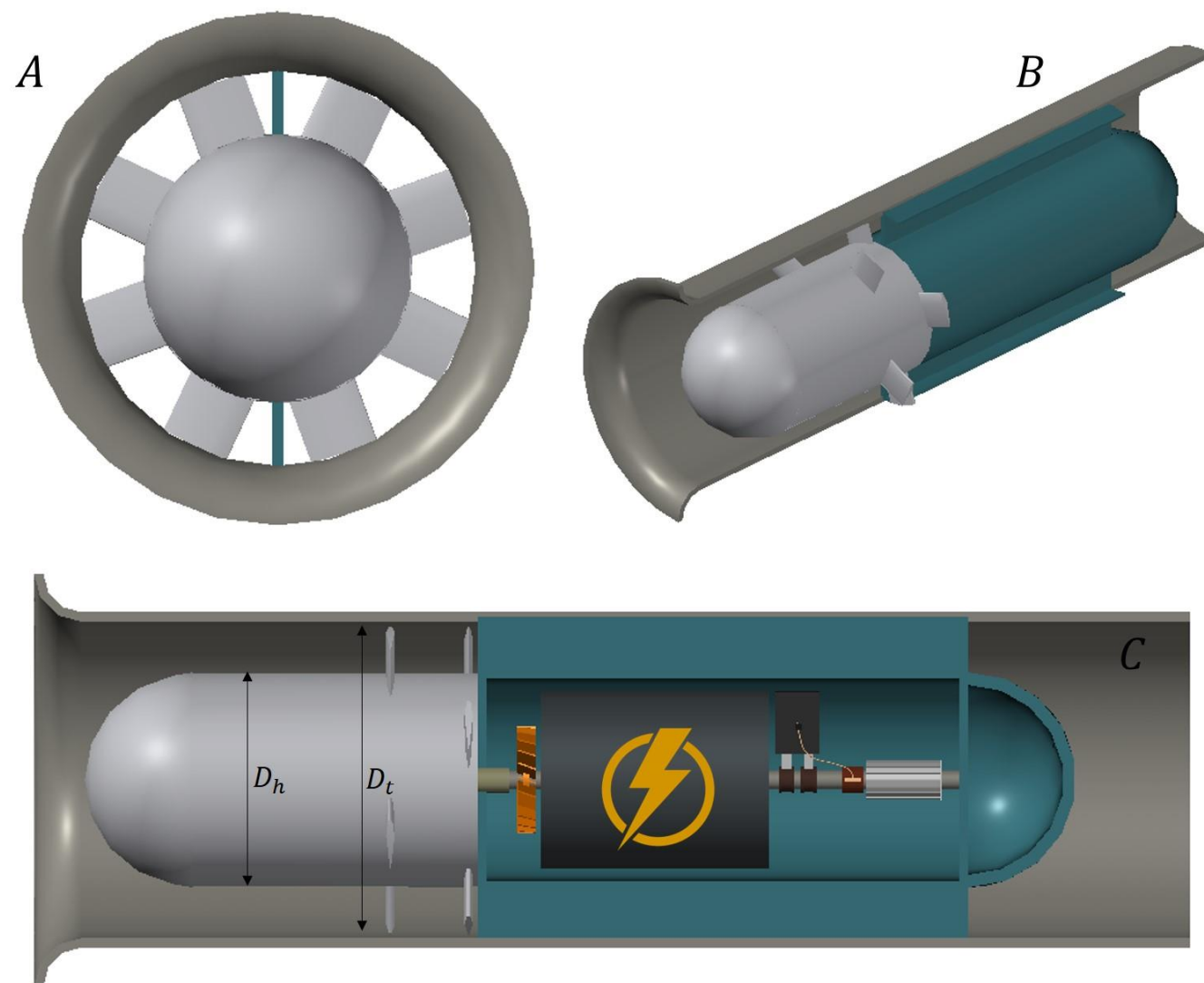
**Figura A.4** Distribuição por classes estatísticas do período de onda na zona de Peniche/Baleal em janeiro

## Apêndice B Aspectos técnicos do segundo modelo

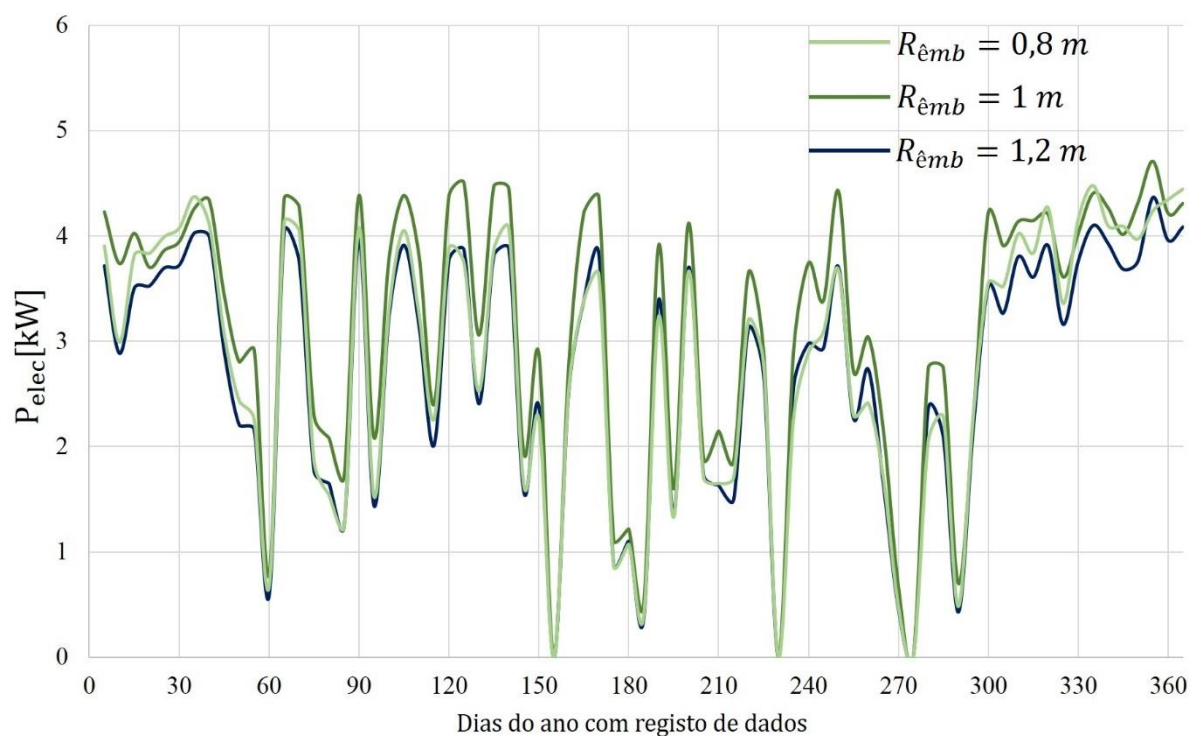


**Figura B.1** (Em baixo) Secção lateral do Êmbolo; (Em cima) A) Anel de vedação, B) Anel estabilizador, C) Gradeamento interior do êmbolo

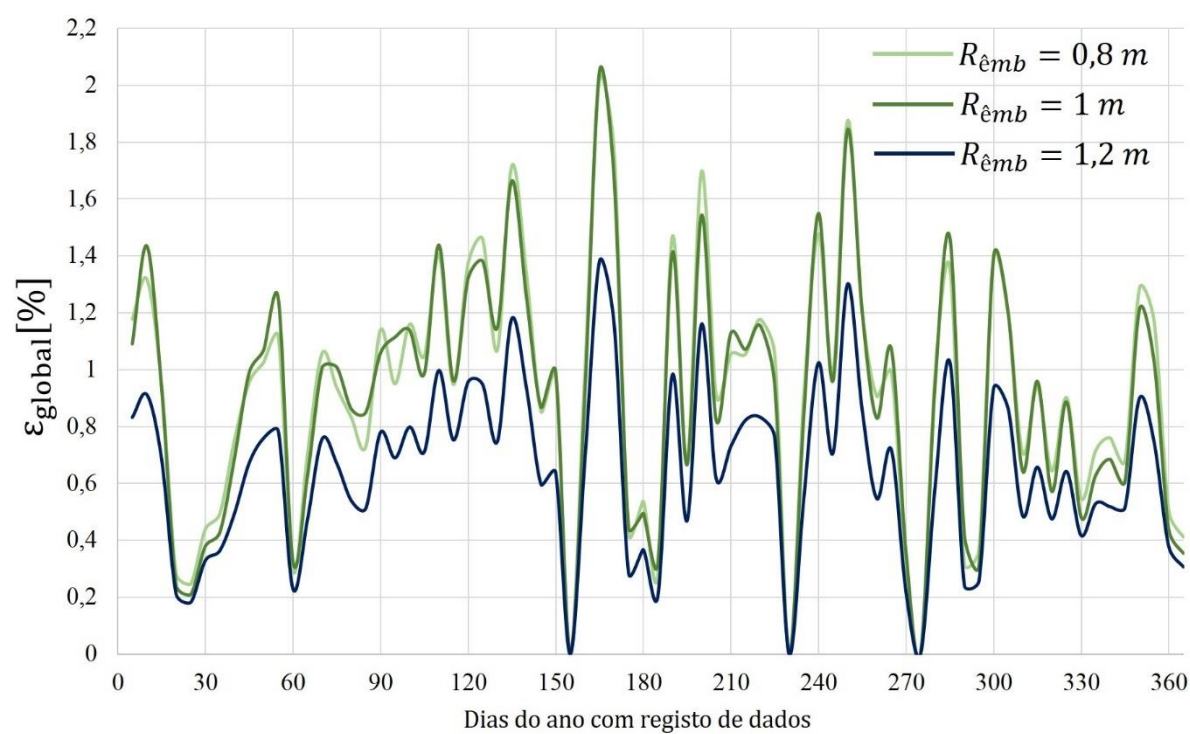




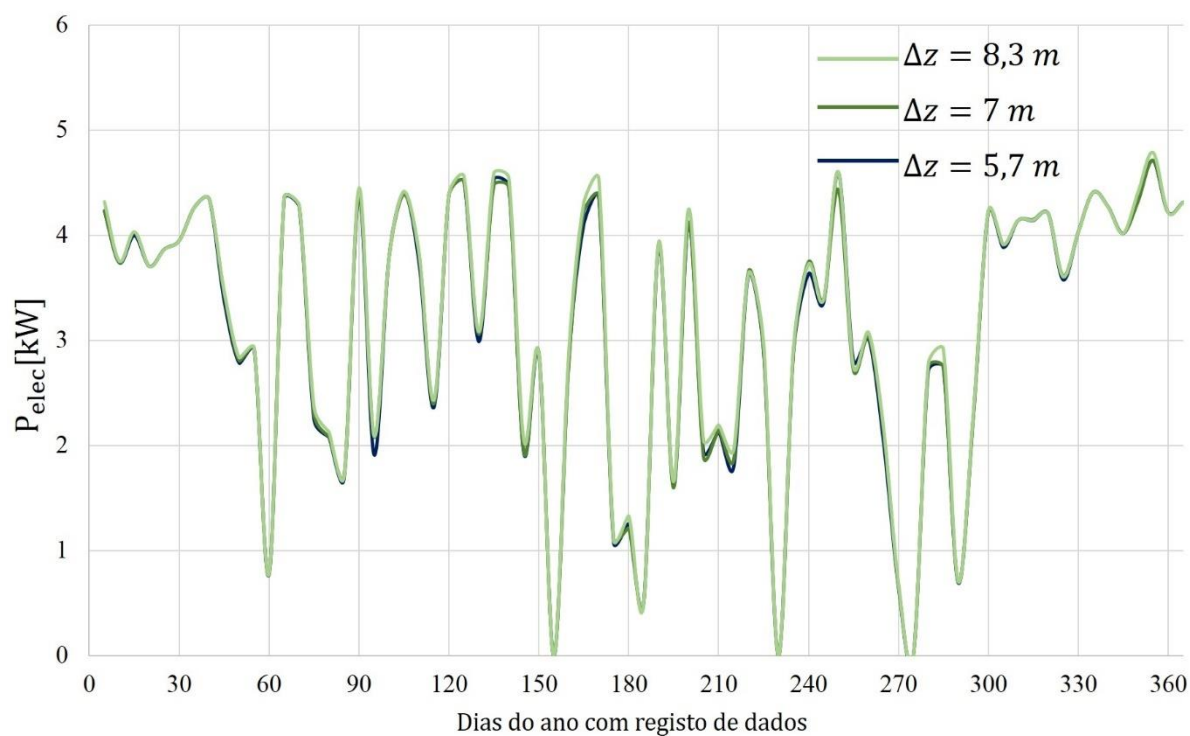
**Figura B.2** Turbina Wells e gerador elétrico. A) Vista frontal da turbina, B) Corte lateral do segmento da turbina, C) Vista lateral do conjunto turbina-gerado



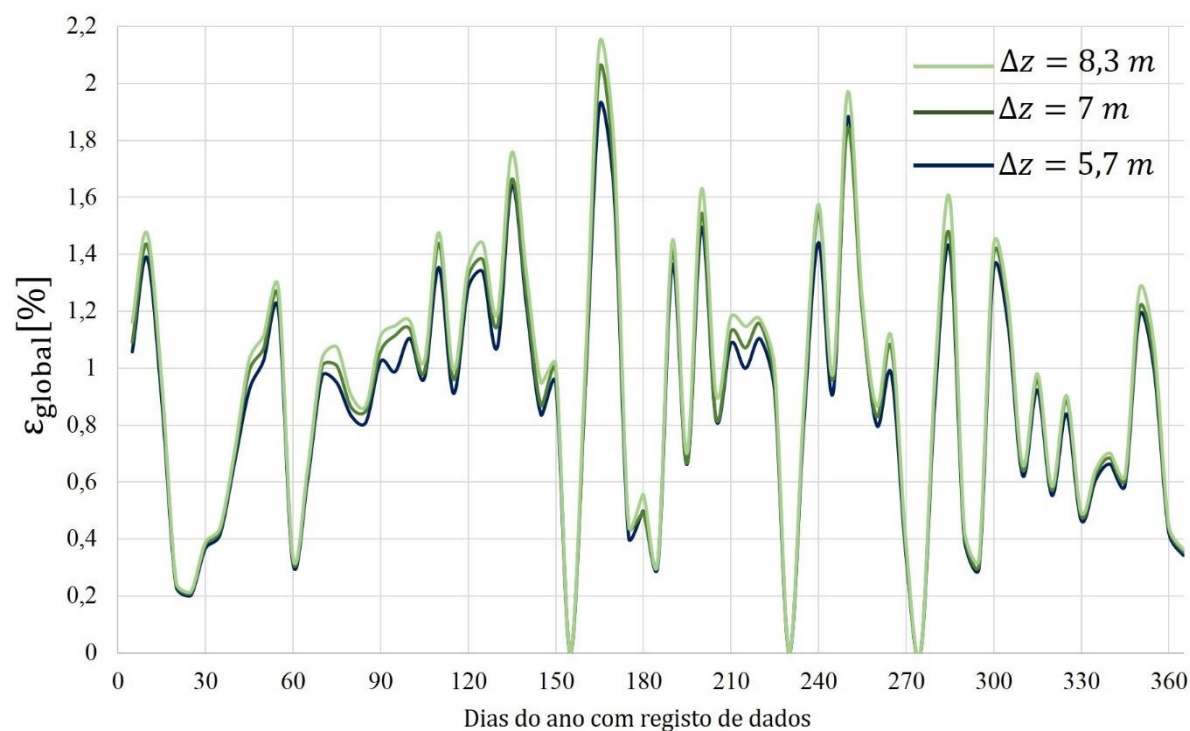
**Figura B.3** Curvas da potência elétrica para diferentes raios do êmbolo (ano 2009)



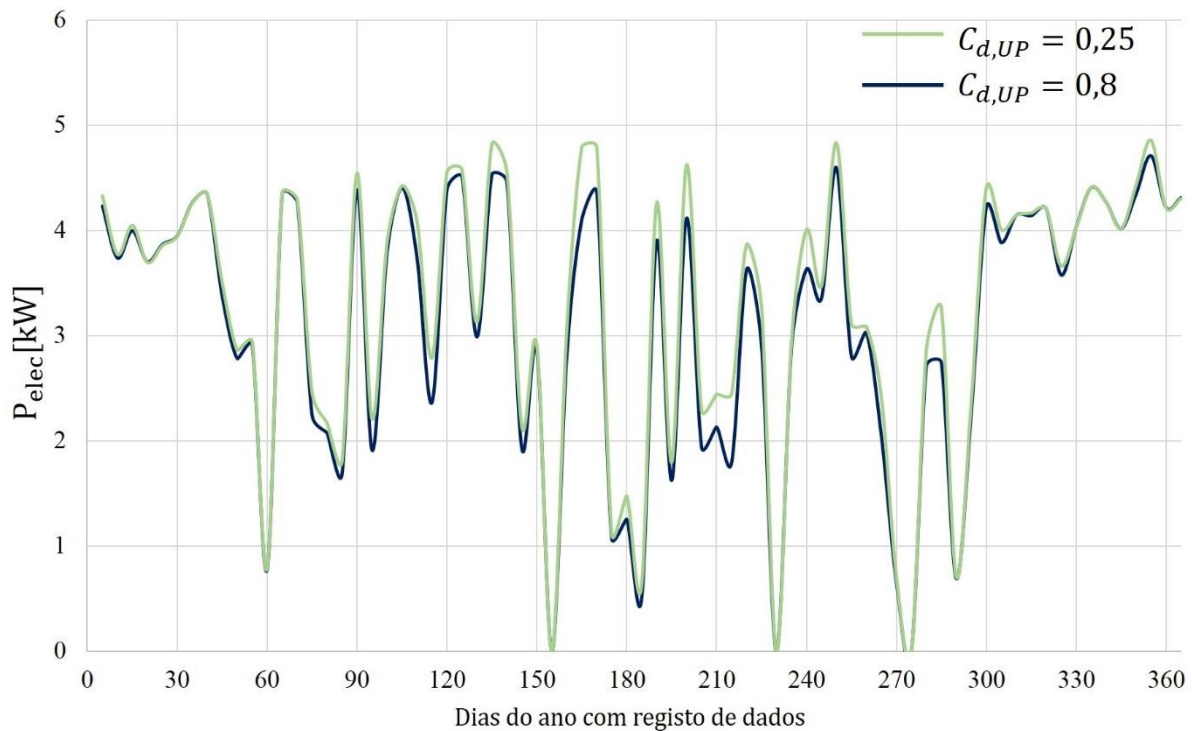
**Figura B.4** Curvas da eficiência global para diferentes raios do êmbolo (ano 2009)



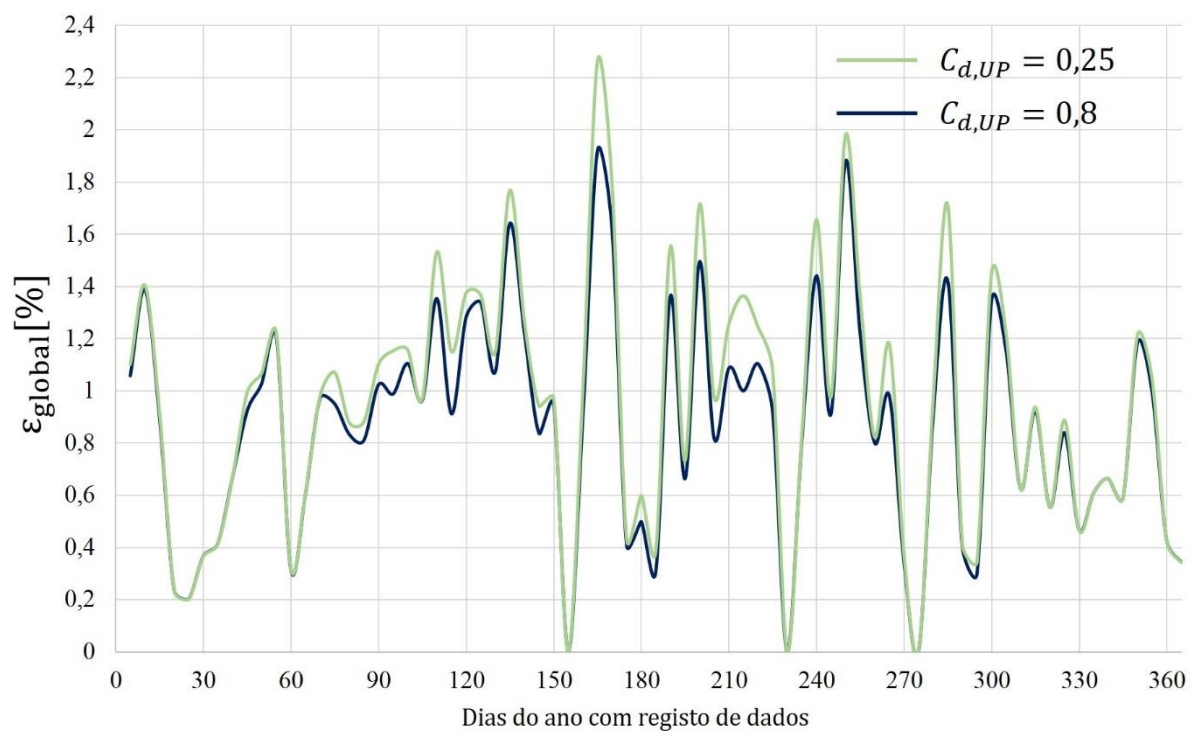
**Figura B.5** Curvas da potência elétrica para diferentes distâncias entre o topo e a base do flutuador (ano 2009)



**Figura B.6** Curvas da eficiência global para diferentes distâncias entre o topo e a base do flutuador (ano 2009)



**Figura B.7** Curvas da potência elétrica para diferentes coeficientes de arrasto relativos ao movimento de subida (ano 2009)



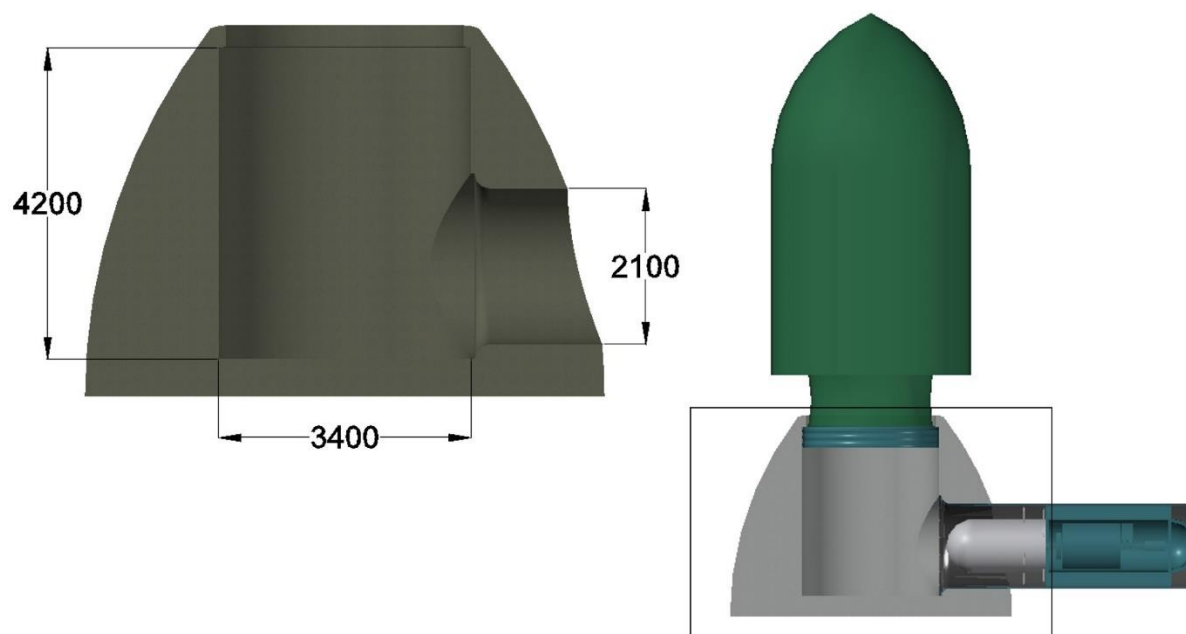
**Figura B.8** Curvas da eficiência global para diferentes coeficientes de arrasto relativos ao movimento de subida (ano 2009)

**Tabela B.1** Resumo das características estruturais do modelo à escala 1:2 ( $Dim = 0,65$ )

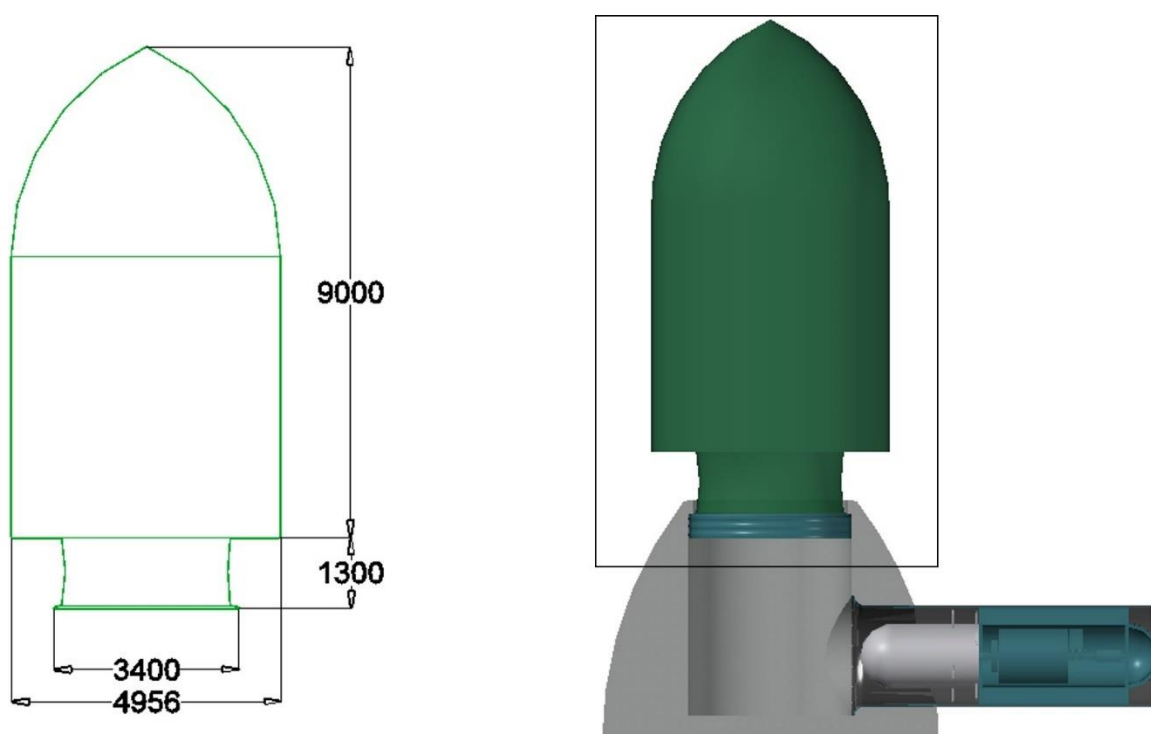
<b>Câmara-de-ar</b>	<b>Material (P.U.)</b>	Betão armado ( $120 \text{ €/m}^3$ )
	<b>Volume</b>	$18,6 \text{ m}^3$
	<b>Altura do cilindro</b>	$3500 \text{ mm}$
	<b>Revestimento do cilindro (P.U.)</b>	Aço inox polido - AISI 316 ( $3,2 \text{ €/kg}$ )
	<b>Volume de revestimento do cilindro</b>	$0,04 \text{ m}^3$
	<b>Massa revestimento do cilindro</b>	$320 \text{ kg}$
<b>Êmbolo</b>	<b>Material (P.U.)</b>	Nylon extrudido ( $2,5 \text{ €/kg}$ )
	<b>Volume de material (<math>V_{nylon}</math>)</b>	$0,51 \text{ m}^3$
	<b>Massa (<math>M_{emb}</math>)</b>	$580,8 \text{ kg}$
	<b>Raio (<math>R_{emb}</math>)</b>	$1000 \text{ mm}$
	<b>Altura (<math>h_{emb}</math>)</b>	$500 \text{ mm}$
	<b>Pressão de contacto (<math>P_c</math>)</b>	$330 \text{ kPa}$
	<b>Material de revestimento dos anéis</b>	PTFE+PEEK
	<b>Coefficiente de atrito médio (<math>\mu</math>)</b>	$0,115$
<b>Flutuador</b>	<b>Distância entre o topo e a base (<math>\Delta z</math>)</b>	$5700 \text{ mm}$
	<b>Diâmetro do topo (<math>D_{tf}</math>)</b>	$3190 \text{ mm}$
	<b>Volume (<math>V_{flutuador}</math>)</b>	$43,6 \text{ m}^3$
	<b>Massa (<math>M_{flutuador}</math>)</b>	$71,4 \text{ kg}$
	<b>Área da base (<math>A_{bf} + A_{bf2}</math>)</b>	$4,8 \text{ m}^2$
	<b>Coefficiente de arrasto na subida (<math>C_{d,UP}</math>)</b>	$0,25$
	<b>Coefficiente de arrasto na descida (<math>C_{d,DOWN}</math>)</b>	$0,8$
<b>Turbina</b>	<b>Tipo</b>	Wells biplanar
	<b>Perfil aerodinâmico das pás</b>	NACA0015
	<b>Coefficiente de fluxo (<math>\phi</math>)</b>	$0,2$
	<b>Coefficiente de queda de pressão (<math>\Delta p_0^*</math>)</b>	$0,4$
	<b>Coefficiente de torque (<math>C_T</math>)</b>	$0,07$
	<b>Eficiência aerodinâmica (<math>\eta</math>)</b>	$0,58$
	<b>Diâmetro interno do segmento da turbina</b>	$\approx 1000 \text{ mm}$
	<b>Comprimento do segmento da turbina</b>	$3700 \text{ mm}$
	<b>Diâmetro do eixo (<math>D_h</math>)</b>	$680 \text{ mm}$
	<b>Diâmetro exterior (<math>D_t</math>)</b>	$1000 \text{ mm}$
	<b>Hub-to-tip ratio (<math>h</math>)</b>	$0,68$
	<b>Solidez por plano do rotor (<math>\sigma</math>)</b>	$0,32$
<b>Gerador</b>	<b>Tipo</b>	PMSG com Conversor de frequências de escala completa
	<b>Número de polos (<math>N_p</math>)</b>	$4$
	<b>Velocidade máxima de rotação (<math>RPM_{max}</math>)</b>	$1500 \text{ RPM}$
	<b>Potência nominal (<math>P_{nom}</math>)</b>	$8,8 \text{ kW}$
	<b>Eficiência média (<math>\eta_G</math>)</b>	$85\%$

Tabela B.2 Resumo das características estruturais do modelo à escala 1:1 ( $Dim = 0,46$ )

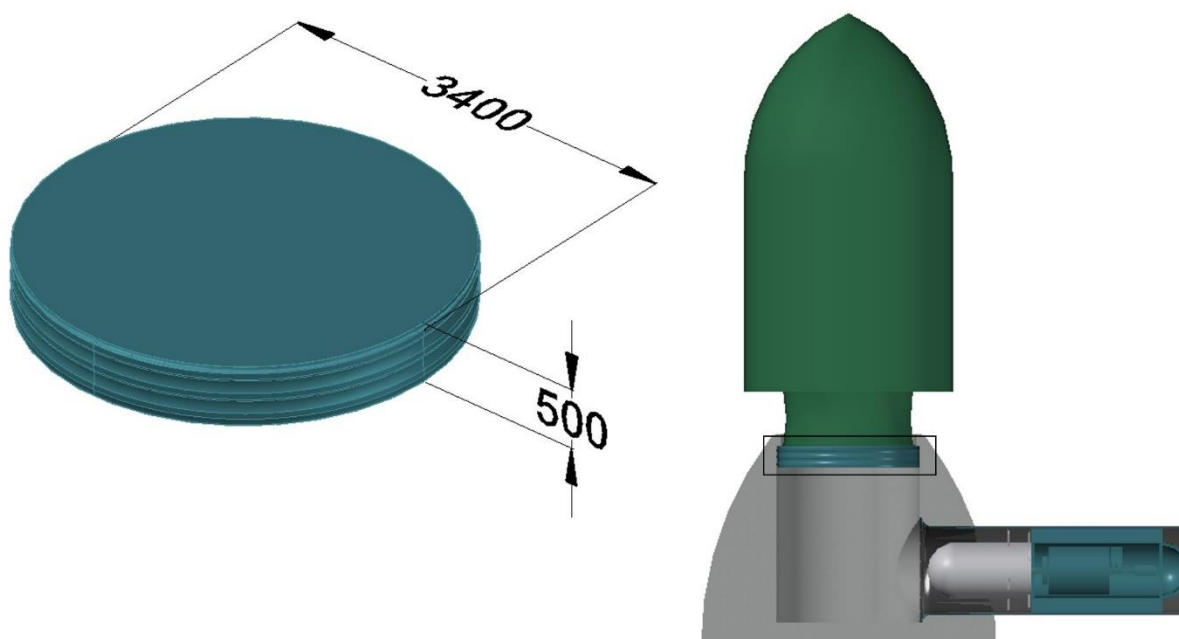
Câmara-de-ar	Material (P.U.)	Betão armado ( $120 \text{ €/m}^3$ )
	Volume	$65,2 \text{ m}^3$
	Altura do cilindro	$4200 \text{ mm}$
	Revestimento do cilindro (P.U.)	Aço inox polido - AISI 316 ( $3,2 \text{ €/kg}$ )
	Volume de revestimento do cilindro	$0,09 \text{ m}^3$
	Massa revestimento do cilindro	$720 \text{ kg}$
Êmbolo	Material (P.U.)	Nylon extrudido ( $2,5 \text{ €/kg}$ )
	Volume de material ( $V_{\text{nylon}}$ )	$1,22 \text{ m}^3$
	Massa ( $M_{\text{emb}}$ )	$1400 \text{ kg}$
	Raio ( $R_{\text{emb}}$ )	$1700 \text{ mm}$
	Altura ( $h_{\text{emb}}$ )	$500 \text{ mm}$
	Pressão de contacto ( $P_c$ )	$350 \text{ kPa}$
	Material de revestimento dos anéis	PTFE+PEEK
	Coefficiente de atrito médio ( $\mu$ )	$0,115$
Flutuador	Distância entre o topo e a base ( $\Delta z$ )	$7000 \text{ mm}$
	Diâmetro do topo ( $D_{tf}$ )	$3190 \text{ mm}$
	Volume ( $V_{\text{flutuador}}$ )	$152,6 \text{ m}^3$
	Massa ( $M_{\text{flutuador}}$ )	$186,9 \text{ kg}$
	Área da base ( $A_{bf} + A_{bf2}$ )	$10,2 \text{ m}^2$
	Coefficiente de arrasto na subida ( $C_{d,UP}$ )	$0,25$
	Coefficiente de arrasto na descida ( $C_{d,DOWN}$ )	$0,8$
Turbina	Tipo	Wells biplanar
	Perfil aerodinâmico das pás	NACA0015
	Coefficiente de fluxo ( $\phi$ )	$0,2$
	Coefficiente de queda de pressão ( $\Delta p_0^*$ )	$0,4$
	Coefficiente de torque ( $C_T$ )	$0,07$
	Eficiência aerodinâmica ( $\eta$ )	$0,58$
	Diâmetro interno do segmento da turbina	$\approx 2000 \text{ mm}$
	Comprimento do segmento da turbina	$6200 \text{ mm}$
	Diâmetro do eixo ( $D_h$ )	$1360 \text{ mm}$
	Diâmetro exterior ( $D_t$ )	$2000 \text{ mm}$
	Hub-to-tip ratio ( $h$ )	$0,68$
	Solidez por plano do rotor ( $\sigma$ )	$0,32$
Gerador	Tipo	PMSG com Conversor de frequências de escala completa
	Número de polos ( $N_p$ )	$6$
	Velocidade máxima de rotação ( $RPM_{\text{max}}$ )	$1000 \text{ RPM}$
	Potência nominal ( $P_{\text{nom}}$ )	$85 \text{ kW}$
	Eficiência média ( $\eta_G$ )	$86\%$



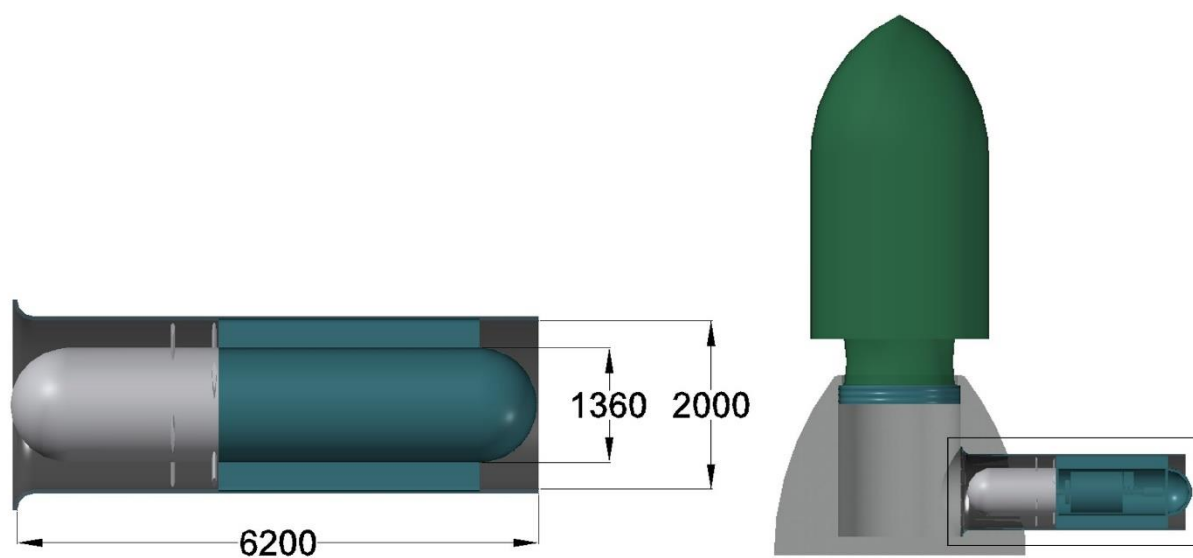
**Figura B.9** Dimensões da câmara-de-ar do modelo à escala 1:1 (medidas em mm)



**Figura B.10** Dimensões do flutuador do modelo à escala 1:1 (medidas em mm)



**Figura B.11** Dimensões do êmbolo do modelo à escala 1:1 (medidas em mm)



**Figura B.12** Dimensões do conjunto turbina-gerador para o modelo à escala 1:1 (medidas em mm)



## Apêndice C Algoritmo da análise numérica

```

a_flutuador(j)=abs(FR(j-1))/M_movel;
v_flutuador(j)=v_flutuador(j-1)+a_flutuador(j)*delta_t;
for i=0:10
    v_flutMED(j)=(v_flutuador(j)+v_flutuador(j-1))/2;
    Fd_med(j)=0.5*ro_agua*Cd_DOWN*(A_bf+A_bf2)*v_flutMED(j)^2;

    Vx_med(j)=(4*A_emb*v_flutMED(j))/(pi*Dt^2*(1-h^2));
    F_pressMed(j)=0.5*A_emb*ro_ar*(Vx_med(j)^2-v_flutMED(j)^2);

    RPM_med(j)=(240*A_emb*v_flutMED(j))/(fi*pi^2*Dt^3*(1-h^2));
    VAT_med(j)=RPM_med(j)*2*pi/60;
    Fpd_med(j)=A_emb*Coef_pd*ro_ar*Rt^2*VAT_med(j)^2;

    ForceDownMed(j)=A_tf*(P_atm+ro_agua*g*(d_sup(j-1)-d_flutuador(j-1))+M_movel*g;
    ForceUpMed(j)=A_bf*(P_atm+ro_agua*g*(d_sup(j-1)-d_flutuador(j-1)+delta_z))+A_bf2*...
    FR_med(j)=ForceUpMed(j)-ForceDownMed(j);

    a_flutuador(j)=abs(FR_med(j))/M_movel;
    v_flutuador(j)=v_flutuador(j-1)+a_flutuador(j)*delta_t;
end

```

*Primeira estimativa*

*Valores ponderados*

**Figura C.1** Exemplo de um ciclo de iteração usado para a estimativa da velocidade final do intervalo iterativo